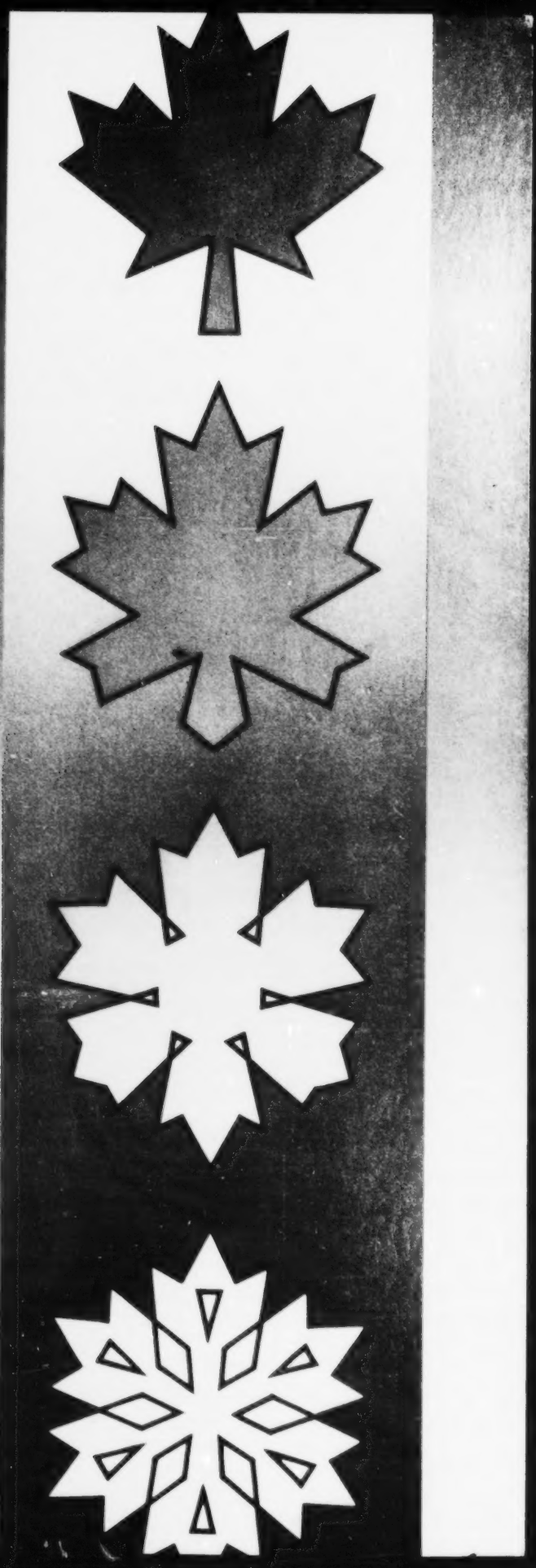
Environment Canada Environnement Canada

# Forestry Economics of Western Canada

CCDC 89-02



Canada

**CLIMATE CHANGE DIGEST**

CCD 87-01 Canadian Climate Impacts Program

CCD 87-02 Implications of Climatic Change for Agriculture in Ontario

CCD 87-03 Implications of Climatic Change for Navigation and Power Generation in the Great Lakes

CCD 87-04 Effects of a One Metre Rise in Mean Sea-Level at Saint John, New Brunswick and the Lower Reaches of the Saint John River

CCD 88-01 The Implication of Climate Change for Agriculture in the Prairie Provinces

CCD 88-02 Preliminary Study of the Possible Impacts of a One Metre Rise in Sea Level at Charlottetown, Prince Edward Island

CCD 88-03 Implications of Climate Change for Downhill Skiing in Quebec

CCD 88-04 Economic Perspectives on the Impact of Climate Variability and Change: A Summary Report

CCD 88-05 Implications of Climatic Change for Tourism and Recreation in Ontario

CCD 88-06 Estimating Effects of Climatic Change on Agriculture in Saskatchewan, Canada

CCD 88-07 Socio-Economic Assessment of the Physical and Ecological Impacts of Climate Change on the Marine Environment of the Atlantic Region of Canada - Phase I

CCD 88-08 The Implications of Climate Change for Natural Resources in Quebec

CCD 88-09 $CO_2$ Induced Climate Change in Ontario: Interdependencies and Resources Strategies

CCD 89-01 Climate Warming and Canada's Comparative Position in Agriculture

CCD 89-02 Exploring the Implications of Climatic Change for the Boreal Forest and Forestry Economics of Western Canada.

Environment Canada Environnement Canada

# EXPLORING THE IMPLICATIONS OF CLIMATIC CHANGE FOR THE BOREAL FOREST AND FORESTRY ECONOMICS OF WESTERN CANADA

A Summary of:

AN EXPLORATION AND ASSESSMENT OF THE IMPLICATIONS OF CLIMATIC CHANGE FOR THE BOREAL FOREST AND FORESTRY ECONOMICS OF THE PRAIRIE PROVINCES AND NORTHWEST TERRITORIES: PHASE ONE

by

E.E. Wheaton, T. Singh and R. Dempster and K.O. Higginbotham, J.P. Thorpe, and G.C. Van Kooten with J.S. Taylor

Prepared for

Climate Change Digest
Atmospheric Environment Service

Prepared by

E.E. Wheaton and T. Singh
SRC Publication No. E-906-61-A-88

This Report contributes to State of Environment Reporting

90-05247/

DISCLAIMER

This publication contains a summary of the results of a study prepared under contract, by the Saskatchewan Research Council, to the Canadian Climate Centre. The views and opinions expressed herein are those of the authors and do not necessarily state or reflect those of the Government of Canada or any agency thereof.

Single copies of this publication may be obtained, free of charge, by writing to the:

Climate Services Division
Canadian Climate Centre
4905 Dufferin Street
Downsview, Ontario
M3H 5T4
(416)739-4324

Copies of the complete report, "An Exploration and Assessment of the Implications of Climate Change for the Boreal Forest and Forestry Economics of the Prairie Provinces and Northwest Territories: Phase One", may be purchased by writing to:

Environment Division
Saskatchewan Research Council
15 Innovation Blvd.
Saskatoon, Saskatchewan
S7N 2X8

Published by Authority of the
Minister of the Environment

©Minister of Supply and Services
Canada 1988

Catalogue No. En57-27/1989-02
ISEN 0-662-56798-6
ISSN 0835-3980

## FOREWORD

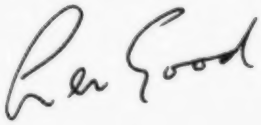
Within the space of one year, four major international statements have declared atmospheric change, and particularly climate warming, a major environmental issue demanding political action.

In June 1988, a large group of policy makers, scientists, economists and other experts from 46 nations, participating in the World Conference on the Changing Atmosphere in Toronto, declared that "humanity is conducting an unintended, uncontrolled globally pervasive experiment whose ultimate consequences could be second only to a global nuclear war." The participants were referring to the rapid change in the composition of the Earth's atmosphere due to human release of pollutants.

Seven months later, in January 1989, the UN General Assembly adopted the "Malta Resolution" that echoed the concerns of the Toronto Conference statement and encouraged governments and organizations around the world to treat climate change as a priority issue. In February, at New Delhi's International Conference on Global Warming and Climate Change: Perspectives from Developing Countries, attendees called global warming "the greatest crisis ever faced collectively by humans." On March 10, 1989, Heads of State from 24 nations signed the 'Declaration of The Hague' which declared that "Today, the very conditions of life on our planet are threatened by severe attacks to which the earth's atmosphere is subjected."

The scientific evidence is increasingly clear that the Earth's atmosphere is undergoing major changes. These changes have already in some respects (such as $CO_2$ concentrations) exceeded the limits of natural atmospheric fluctuations over at least the past 100,000 years and are projected to become significantly larger with time. It is highly probable that the world we leave to the next generations will be climatically unlike any that mankind has previously experienced.

Numerous international studies have already attempted to evaluate the implications of these changes. In Canada, the Atmospheric Environment Service of Environment Canada has been at the leading edge of this activity, having implemented, in 1984, a program to assess and identify the potential social and economic impacts of climate warming. This publication series has been developed to provide, in summary format, the results of these studies and to identify other issues related to climate change.



Len Good
Deputy Minister
Environment Canada

## PREFACE

The Canadian Climate Centre (CCC) has funded a number of studies to investigate the potential impacts, on various sectors of the Canadian economy, of climate warming expected because of the increasing concentrations in the atmosphere of the "greenhouse gases". The equivalent of a doubling of the amount of $CO_2$ was the situation selected.

The first issue of the Climate Change Digest identified the major socio-economic impact studies undertaken since 1984. A list of earlier titles in the series appears on the inside front cover.

This report summarizes the initial results of a preliminary study to assess the implications of $CO_2$-induced climate change for the boreal forests of the Prairie Provinces and the Northwest Territories.

The objective of the study was to assess the current state of knowledge of climate change impacts on tree growth and physiology, to develop a framework to assess the use of climate change/forest/economic models and to undertake preliminary climatic change impact assessments.

Although the report identifies significant gaps in the knowledge of how the forest will respond to climate change, it also makes clear that future changes in climate caused by the greenhouse effect could have a significant impact on the boreal forests of western Canada.

Dr. D. Kirk Dawson
Director General
Canadian Climate Centre

## 1. STUDY HIGHLIGHTS

- An extensive literature review was undertaken regarding climatic change impact on tree growth and physiology, direct effects of CO2 enrichment, forest productivity, forest zonation, forest fires, insects and diseases, and forest economics. Many areas requiring further study were identified.

- Changed climatic resources were calculated and described for several climatic change scenarios based on General Circulation Model (GCM) results. For example, growing degree-day results indicate increases of 13 to 48% above normal for the climatic change scenario gridpoints examined.

- The potential northward shift of the boreal forest was examined using the 600 and 1,300 growing degree-day isolines as approximations of the northern and southern boundaries of the boreal forest. The climatic change scenarios indicate considerable shifts in the forest's climate zones as a result of "greenhouse gas" warming. The potential northward shift in the northern boundary ranges from about 100 to 700 km. The potential northward shift in the southern boundary ranges from about 250 to 900 km.

- A climatic index of potential biomass productivity and its component factors were used to explore the impacts of the climatic change scenarios on the boreal forest. Examples of potential biomass productivity changes include decreases from normal for southern locations of about 2 to 12% and increases up to about 50% above normal for gridpoints in the northern part of the predominantly forest zone.

- A multiple linear regression model relating forest productivity to climate was developed and tested. Even with the limited data, there is a significant positive relationship of forest growth rate to both growing season temperatures and moisture availability.

- A climatic zonation model for the boreal forest was designed and tested. Results of the impacts of one of the climatic change scenarios were calculated and discussed. Preliminary results indicate that the aspen parkland ecoclimatic zone would extend northward into the western part of the study area and the boreal temperate ecoclimatic zone would extend westward into the eastern part of the study area under climate warming.

- A dynamic economic model for analyzing the economic benefits of climatic change was identified. The problem of determining the appropriate objective function and constraints for such a model was addressed and some preliminary qualitative estimates were made. In addition, it was determined that there were important nonmarket amenities that also had to be taken into account in the objective function. Needs for further research and linkages with the non economic team members were identified.

- A systems analysis approach was developed to illustrate and explore the climatic change/forest/economics/policy interactions. An interdisciplinary integration was applied to the study.

## 2. INTRODUCTION AND OBJECTIVES

The structure and function of the boreal forest ecosystem is more clearly dependent on climate than many other ecosystems. Many characteristics of the boreal forest, including tree physiology and productivity, vegetation zones, fire, and insects and diseases are inextricably linked to climate. This report summarizes Phase I results of an exploratory study to assess the implications of $CO_2$-induced climatic change for the boreal forest of the Prairie Provinces and the Northwest Territories. The study area forms part of an extensive forest belt stretching from the eastern coast of Canada to Alaska, constituting 82% of the forest land in Canada. In addition to its significant contribution to the Canadian economy, the boreal forest provides irreplaceable habitat for wildlife and other nonmarket values such as conservation, pollution absorption, recreation and global climate regulation.

The objectives of this study were to:

(1) review and assess the current state of knowledge regarding $CO_2$-induced climatic change impacts on tree growth and physiology (including the direct effects of elevated $CO_2$, forest zonation, forest fires, insects and diseases, forest management, forest economics and policies);
(2) search for appropriate methodologies for assessing climatic change effects listed in point one;
(3) develop a framework to assess the models for use in the climatic change/forest/economics system and to develop a systems analysis design that demonstrates and evaluates the linkages and feedbacks among models and modellers;
(4) evaluate and select climatic change scenarios for use in this study;
(5) undertake preliminary climatic change impact assessments quantitatively, where possible, and qualitatively if not possible at this time;
(6) determine recommendations for further study.

## 3. LITERATURE REVIEW

Although a few studies have examined the potential effects of the expected climatic warming on agricultural crops (e.g. Parry et al. 1988; Arthur et al. 1987), very few have focussed on the boreal forest. Kauppi and Posch (1985, 1988) and Binkley (1988) are among the few exceptions. Kates (1985) has provided an overview of climate impact assessment and refers to some relevant work in forestry. Other relevant literature are biomass studies, including Williams (1985), Williams and Masterton (1983), Williams et al. (1988) and Emanuel et al. (1985). The bibliography compiled by Peterson et al. (1983) is useful as it includes the impact of climatic variation on biomass accumulation in the boreal forest zone.

In the literature review we draw attention to relevant information, as well as to suggest possible impacts. The topic areas examined include direct effects of $CO_2$ enrichment, and climatic change effects on physiology and growth, forest

production, forest ecosystem structure and function, climatic zonation, impact modelling, forest fires, insects and diseases, and methods to estimate economic benefits.

### 3.1 Direct Effects of $CO_2$ Enrichment on Economically Important Tree Species

Little is known about the direct effects of $CO_2$ enrichment on principal boreal tree species, although it appears to be a result of effects on photosynthesis and water use efficiency. Studies with lodgepole pine, white spruce and trembling aspen suggest a significant "fertilizer" effect of enhanced $CO_2$ on biomass production, height growth, leaf area production, and branching in the seedling stage. The magnitude of the effect is strongly affected by levels of other necessary environmental factors and mineral elements. No studies are currently available that suggest how well the results of research on seedlings can be extrapolated to older trees.

Water use efficiency (photosynthesis/transpiration) increases for most species under enriched $CO_2$ as a result of partial stomatal closure. The extent of improvement depends on the magnitude of the closing effect and on the physiological characteristics of the species. Shade tolerant plants usually have higher stomatal resistance than intolerant species under normal $CO_2$ conditions. As a result, the intolerant species may show the largest effect.

### 3.2 Effects on Physiology, Growth, and Production

Climate affects many of the physiological processes in trees that ultimately lead to the production of wood. The basic process of production is photosynthesis, and the net rate of gain from photosynthesis depends on temperature, reaching a maximum at 15 to 25°C for boreal tree species. However, tree species may be able to adjust this response as temperature changes, either by "acclimation" within the individual plant, or by migration of local populations with different genetic adaptations to climate.

Probably more important is the limit on production placed by the length and warmth of the growing season. Trees must become dormant to survive the boreal winter, and no net production occurs during the prolonged sub-freezing temperatures. In spring, a sufficient period of warm temperatures must occur before buds open and new leaves begin photosynthesis. Therefore climates with longer and warmer growing seasons may have more production.

Moisture supply is also essential for plant production. If moisture is deficient, plants close their leaf pores to reduce water loss, but this also prevents the uptake of $CO_2$ necessary for photosynthesis.

Plants also require a supply of mineral nutrients, such as nitrogen and phosphorus, from the soil. The process of nutrient release from dead organic matter is relatively slow at low temperatures in the boreal zone and this may cause nutrient deficiency. Climatic warming should accelerate nutrient cycling and therefore have a beneficial effect on boreal production if litter quality is not limiting.

As a result of all of these factors, forest productivity is generally higher in warmer and moister climates. Many writers conclude that the supply of moisture is generally adequate in the boreal forest, and that temperature is the most important factor limiting productivity. However, the boreal forest in the study area is relatively dry, so moisture deficiency must also be considered a potential limiting factor. There seems to be little information available on the incidence of moisture stress in boreal species.

### 3.3 Effects on the Structure and Function of Boreal Forest Ecosystems

A number of factors related to the structure and function of boreal forest ecosystems may be affected. One of the most important ways in which organisms interact in an ecosystem is through competition for resources. Studies have yet to be done in forest ecosystems regarding how these relationships may change under enhanced $CO_2$. Competitive interactions may be altered because each species responds differently. Various other processes, such as decomposition of dead organic material or streamflow, act to preserve, add or remove resources from the system. These processes are also involved in effecting change. However, little is known about the quantitative nature of boreal ecosystem processes.

### 3.4 Effects on Forest Zonation

Another important aspect of the impact on forests of climate is the zonation of different types of vegetation. From the main boreal forest, there is a transition northward to the treeless arctic tundra. In eastern North America, the temperate deciduous forest is located to the south of the boreal forest, but in the Prairie Provinces there is a transition to the drier grassland zone.

In general, the northern and southern boundaries of the boreal forest are correlated with patterns of temperature. However, the transition from boreal forest to grassland appears to be related to increasing climatic aridity. A comparison of forest distribution and spatial patterns of climatic parameters suggests that the balance between temperature and precipitation is critical for the transition from boreal to grassland ecozones. Within the main boreal zone, there is also variation in species composition reflecting the gradient from more moist to drier climates from east to west.

### 3.5 Modelling the Effects of Climatic Change and the Direct Fertilization Effect of $CO_2$

Modelling of the direct fertilization effect of $CO_2$ and of the effects of climatic change on boreal ecosystems is still in its infancy. A variety of models has been developed to predict the growth of forests. Some of these are relatively simple, and rely on finding statistical relationships between measures of productivity and measures of climate. Such relationships can be improved by considering characteristics of the forest as well as climate and by restricting the geographic area.

More complex mathematical models have been developed that simulate more of the processes in the forest. This allows a wider range of predictions than the simple models. Some of these models attempt to simulate very closely the physiological processes in the plant.

The less detailed models, while simulating some processes, also rely on the simple statistical approach for some relationships. These models are useful for predicting production in some types of forest, and for predicting changes in forest composition over hundreds of years of succession or climatic changes.

Unfortunately, none of the models reviewed was completely suitable for the purposes of this study in its current form. Some of these models require daily measurements of plants, soil, and/or weather, therefore are not suitable for prediction over large areas. Some of the models have been developed for a particular forest type, so the numbers used are not appropriate to the boreal forest. Other models are more generally applicable, but require modifications to relate their predictions more closely to actual growth data in the study area. Therefore models more appropriate to climatic change impact assessment for the boreal forest should be developed.

### 3.6 Effects on Forest Fires, Insects and Diseases

Forest fire activity is strongly related to weather events. Similarly, the activity, abundance and distribution of some insects and diseases are influenced by weather and climate. In general, the projected climatic changes can be expected to increase fire frequency and to increase the activity of most insects and diseases common to the boreal forest. Also, the season for forest fires and length of activity of insects and diseases would be extended with an increase in the length of the warm season. Changes in plant species and cover would cause shifts in insect and disease populations.

### 3.7 Methods to Estimate Economic Benefits of Climatic Change

Assessment of the economic benefits or costs of climatic change requires the use of applied welfare economics. In such analyses, it is important to distinguish between economic effects and economic benefits. Economic effects include changes in income distribution as well as changes in economic surpluses, namely, producer surplus and consumer surplus. Only the latter (i.e. surpluses) constitute economic benefits (or costs). The principles of applied welfare economics and the tool of cost-benefit analysis measure only economic benefits and costs, that is, changes in economic surpluses. Defining economic benefits in this manner implies that a measure such as value added is an invalid surrogate for economic benefit. The reason is that value added does not take into account the opportunity cost of the resources that are diverted from other industries to accommodate the change in the industry under investigation (Stabler, Van Kooten and Meyer 1988).

This does not imply, however, that measures of economic effects are unimportant, that value added determined from input-output models is not a useful measure. Measures of economic impact are important because they indicate how climatic changes may affect the distribution of economic benefits. Nonetheless,

for the purposes of the current study, the research indicated that it would, in the first instance, be appropriate to determine whether or not there were economic benefits (as opposed to costs) from climatic change and what the magnitude of these might be.

Three approaches to the measurement of economic benefits were examined; namely, econometric modelling, linear programming and dynamic optimization. Several criteria were used to evaluate existing models. The most important of these criteria was the extent to which the methods adhered to the principles of applied welfare economics. The methodology chosen must be able to identify and quantify the discounted stream of net economic benefits and, given the nature of climatic change and forest ecosystems, the model must be dynamic. Hence, several econometric models are disqualified. Dynamic optimization models do satisfy these criteria.

The second criterion for selection of an appropriate methodology was "modification." A typical characteristic of econometric models is that they are generally specifically designed for a given problem and are not very malleable. This is also the case with dynamic optimization models, but the techniques for specifying and estimating these models are not as heterogeneous as is the case with econometric models. Therefore, a model was suggested which could be modified to take into account uncertainties in forest growth, uncertainties caused by insects, disease and forest fires.

The final criterion was the practical nature of the estimation of the model. These criteria resulted in the recommendation of a dynamic programming approach as holding the most promise for the assessment of the economic benefits of climatic change.

## 4. CLIMATIC CHANGE IMPACT ANALYSES AND PRELIMINARY RESULTS

### 4.1 Climatic Change Models

The climatic change of particular concern is that based on the well documented rise in atmospheric $CO_2$ and other "greenhouse gas" concentrations and projections of these trends. The climatic change scenarios used to explore climatic change and its effects are hybrid types developed by applying General Circulation Model (GCM) based adjustments to historical climatic data (1951-1980 normals), a method developed by Williams et al. (1988). The GCM adjustments for a 2xCO2 climate are those based on the Goddard Institute for Space Studies (GISS) and the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) GCM results. GCM outputs were provided from the Canadian Climate Centre for gridpoints within and around the study area (Street pers. comm., 1987).

### 4.2 Climatic Resources for Forestry

Several models were used to analyze the impacts of the climatic change scenarios on the thermal climate (e.g. growing degree-days), the moisture climate (e.g. precipitation effectiveness and dryness factor), and the combined thermal-moisture effects (climatic index of biomass potential (Turc and Lecerf

1972). These climatic factors influence the production, zonation and other characteristics of the forest.

The shift in the position of the thermal boundaries of the forest under a warmer climate can be determined using the 600 and 1,300 growing degree-day isolines as approximations of the northern and southern boundaries of the boreal forest. Both the GISS and GFDL GCM based scenarios show considerable shifts in the forest climate zones using this method, with the GISS scenario producing the greatest shifts because of its higher temperatures (Figures 1 and 2). The shift in the northern boundary, as implied by the climatic change scenarios, ranges from about 100 to 700 km, and the shift in the southern boundary is greater, about 250 to 900 km (Table 1). Aspects to be questioned are the rate of change of the forest in response to a change in thermal resources and the suitability of the growing degree-day method for examining forest zone shifts. Tree species may be able to adjust either by acclimation within the individual plant, or by migration of local populations with different genetic adaptations to climate. Although in general the boundaries of the boreal forest are related to temperature patterns, the transition from boreal forest to grassland also appears to be related to increasing climatic aridity.

Growing degree-day results indicate an increase of 35 to 48% above normal for the GISS scenario gridpoints and 13 to 40% for the representative GFDL gridpoints (Table 3). If the growing season thermal resources increase to the levels indicated by either of these climatic change scenarios, the climate may be more suitable for grassland vegetation for a large portion of the area presently occupied by the boreal forest.

Changes in potential biomass productivity (CA), the subcomponents of CA, the dryness and heliothermic factors, and precipitation effectiveness, under the influence of four climatic change scenarios were assessed using a few points in each of the three main forest zones (forest-grassland, predominately forest and forest-tundra). Preliminary results indicate that potential biomass productivity could increase up to about 50% above the productivity estimates based on the normal climatic data (1951-1980 means) (Table 3). The productivity increases are considerably less, or even decreases, without the increase in precipitation projected by the GCMs.

Two new preliminary impact models were developed for the purposes of this study, one to model boreal zonation and the other to model forest productivity. The boreal zonation model assigns stations to vegetation zones on the basis of their growing season temperatures and annual precipitation. The northern boundaries are modelled as related to temperature only, while the southern boundaries are set by a mathematical relationship between temperature and precipitation. When this model is used for representative grid points in the study area, it assigns their present vegetation zones correctly under the present climate. The preliminary results using the GFDL scenario indicate that the aspen parkland ecoclimatic zone would extend northward into the western part of the study area and the boreal-temperate ecoclimatic zone would extend westward into the eastern part of the study area (Table 2).

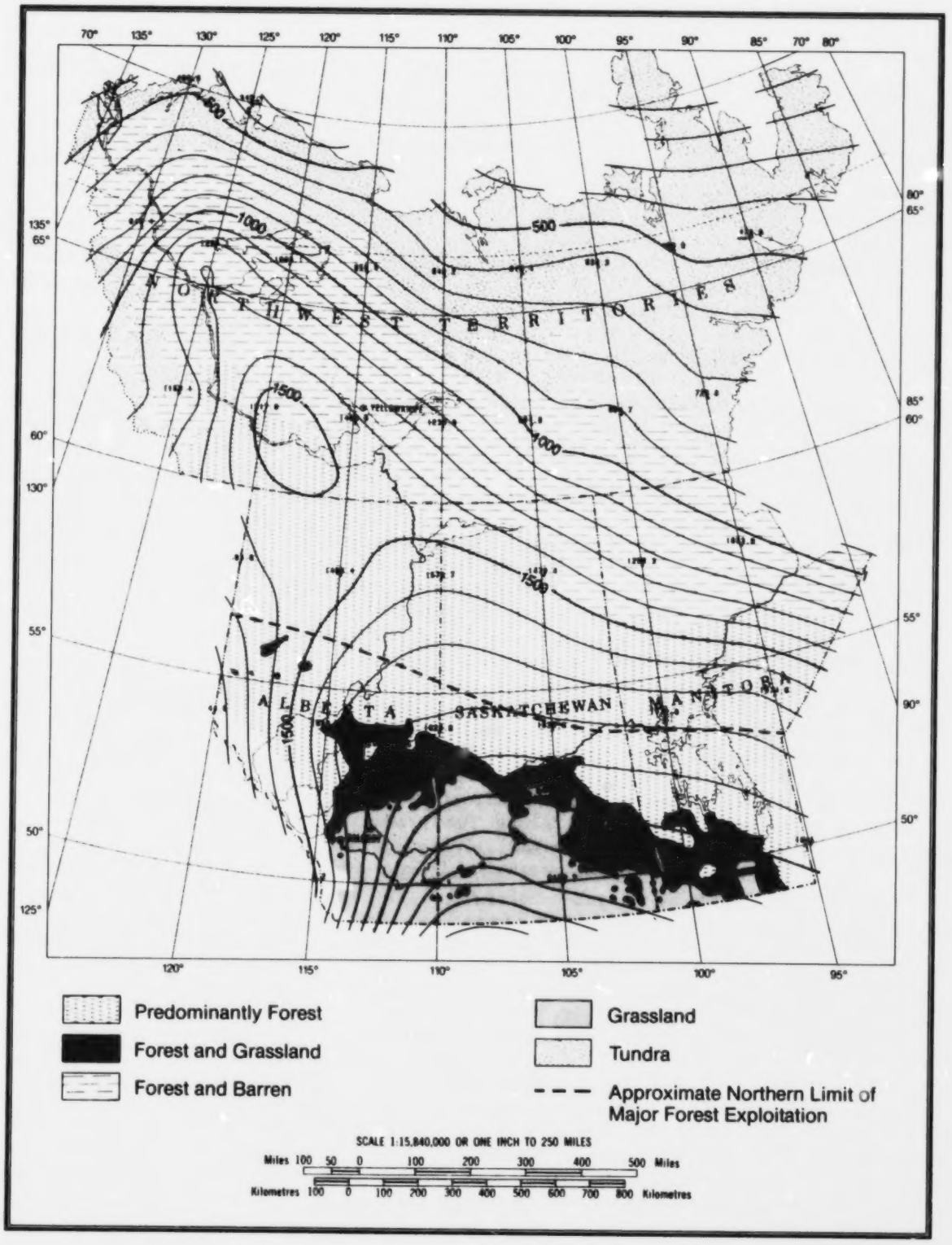



Figure 1 Mean Annual Growing Degree-Days (Above 5°C) for the GISS-Based Climatic Change Scenarios.

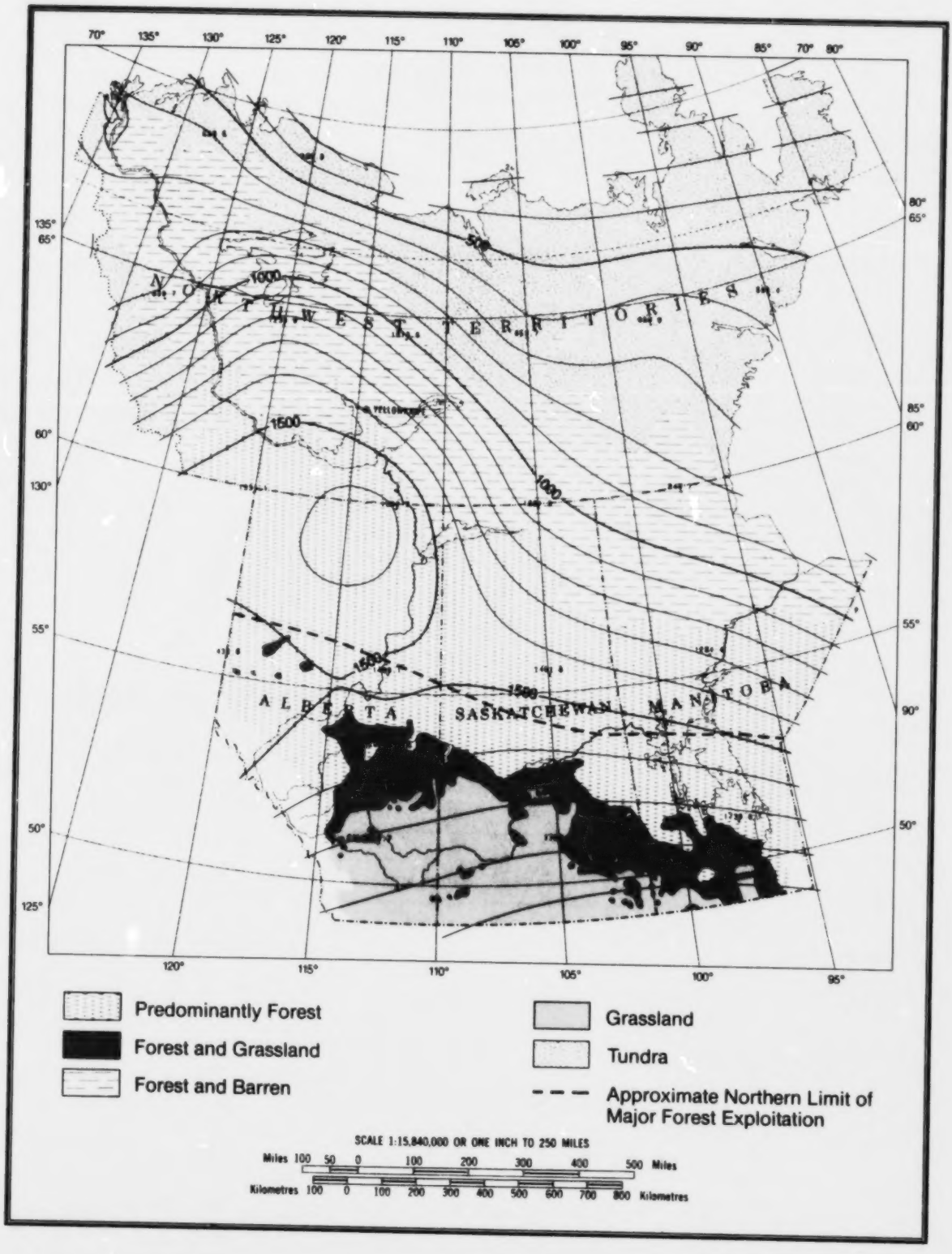



Figure 2 Mean Annual Growing Degree-Days (Above 5°C) for the GFDL-Based Climatic Change Scenarios.

Table 1. Northward Shift (km) in the Northern and Southern Boundaries of the Boreal Forest (delimited by the 600 and 1300 growing degree-day isolines) as implied by the GISS- and GFDL-based Climatic Change Scenarios.

| Forest Boundary | Climatic Change Scenario | |
|---|---|---|
| | GISS | GFDL |
| Northern | 80 to 720 | 100 to 730 |
| Southern | 470 to 920 | 250 to 900 |

Table 2. Change in Vegetation Zonation as implied by the GFDL-based Climatic Change Scenario (with precipitation increases).

| Gridpoint Location (latitude, longitude) | Present Zonation | GFDL1 Zonation |
|---|---|---|
| 64.4° N, 120° W | subarctic | aspen parkland |
| 59.9° N, 120° W | boreal | aspen parkland |
| 55.5° N, 105° W | boreal | boreal-temperate |
| 51.1° N, 112.5° W | grassland | grassland |

Table 3. Climatic Change Impacts in Relation to Normal Climatic Values[a].

| | Location A (58° 00'N 110° 00'W) | | Location B (54° 00'N 105° 00'W) | | Location E (64° 24'N 120° 00'W) | | Location F (55° 30'N 105° 00'W) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Climatic Change Scenario | | | | | | | |
| | GISS1 ($2xCO_2TP$)[c] | GISS2[b] ($2xCO_2T$) | GISS1 ($2xCO_2TP$)[c] | GISS2 ($2xCO_2T$) | GFDL1 ($2xCO_2TP$)[c] | GFDL2[b] ($2xCO_2T$) | GFDL1 ($2xCO_2TP$)[c] | GFDL2 ($2xCO_2T$) |
| GROWING DEGREE-DAYS (GDD) | +35% | +35% | +48% | +48% | +40% | +40% | +31% | +31% |
| PRECIPITATION EFFECTIVENESS INDEX (I)[d] | +22% | -10% | +12% | -10% | -6% | -8% | +16% | -7% |
| DRYNESS FACTOR (Fs)[e] | +21% | +4% | -12% | -21% | -28% | -28% | +19% | +4% |
| HELIOTHERMIC FACTOR (HT) | +44% | +44% | +33% | +33% | +44% | +44% | +26% | +26% |
| BIOMASS POTENTIAL (CA) | +58% | +17% | +19% | -2% | +22% | +13% | +39% | +5% |

| | Location C (58' 00'N 120° 00'W) | | Location D (50' 00'N 100° 00'W) | | Location G (59' 54'N 120° 00'W) | | Location H (51' 06'N 112° 30'W) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | GISS1 | GISS2 | GISS1 | GISS2 | GFDL1 | GFDL2 | GFDL1 | GFDL2 |
| GROWING DEGREE-DAYS (GDD) | +39% | +39% | +38% | +38% | +34% | +34% | +13% | +13% |
| PRECIPITATION EFFECTIVENESS INDEX (I) | +19% | -8% | +3% | -11% | +6% | -9% | +17% | -8% |
| DRYNESS FACTOR (Fs)[e] | -3% | -17% | +4% | -2% | +10% | -4% | +2% | -24% |
| HELIOTHERMIC FACTOR (HT) | +54% | +54% | +21% | +21% | +55% | +55% | +46% | +46% |
| BIOMASS POTENTIAL (CA) | +53% | +27% | +1% | -12% | +46% | +13% | +118% | +44% |

[a] Values are the percentage increases or decreases in relation to the mean climatic values for the 1951 to 1980 standard period (HIST). Gridpoint locations are shown in Figure 1.1 of the main report, are different for GISS than GFDL, and are chosen to represent main forest zones.
[b] Scenarios GISS2 and GFDL2 use normal precipitation means.
[c] T and P stand for temperature and precipitation.
[d] Thornthwaite (1931) methodology.
[e] Higher values of Fs indicate less dry, i.e. more moist conditions.

A preliminary model relating forest productivity and a measure of temperature and moisture availability was also developed for this study. Multiple linear regression analysis of mean annual increment on potential evapotranspiration and an index of moisture for 21 forest sections in the study area was used to produce the relationship. It shows a good statistical relationship between forest productivity and climate ($R^2 = 0.75$). Even with the limited data, there is a significant positive relationship of forest growth rate to both growing season temperatures and moisture availability.

## 4.3 Economic Impact Models

Three thrusts for continued economic research (including further investigation and extension of models) are considered in the study.

(1) The most promising economic model for climatic change impact assessment appears to be dynamic programming (DP) (Lyon and Sedjo 1983). DP is an applied optimal control model that can be used to determine an optimal forest rotation, one that maximizes the sum of discounted economic surpluses. It also appears that the DP model can be modified to take into account uncertainty. Thus, stochastic DP is considered in this study as a more appropriate means for accommodating the effects of climatic change (see also Van Kooten 1988).

(2) The forest industry of the study region is a part of an exporting national forestry industry. Consequently, the effects of international trade on economic surpluses cannot be ignored. A theoretical, microeconomic model of trade is developed and consequences on economic benefits for the study region are examined within the model. Theoretical investigation indicates that so-called beneficial climatic change could result in either a net gain or a net loss to the study region. However, these conclusions need to be investigated quantitatively as they depend upon the elasticities of domestic demand and supply curves and the export supply and import demand of trading partners (Van Kooten and Arthur 1988). Finally, this research is important for identifying the objective function in the DP model.

(3) Another economic aspect of the study concerns the valuation of amenities associated with the forest itself, amenities that are not traded in the market. These nonmarket characteristics involve recreational activities, wildlife habitat, and the value of the forest as a watershed and global climate/pollution regulator. In addition, the multiple use of the forest changes the nature of the model because management of the forest will obviously affect each use in a different manner. These multiple and nonmarket uses need to be reflected in the objective function in the DP model.

## 4.4 Climatic Impact System Design

A preliminary climatic change/forest/forestry/economics system diagram was developed for this study to illustrate the interconnections among the main models and impacts as well as feedback loops (Figure 3). The results from each

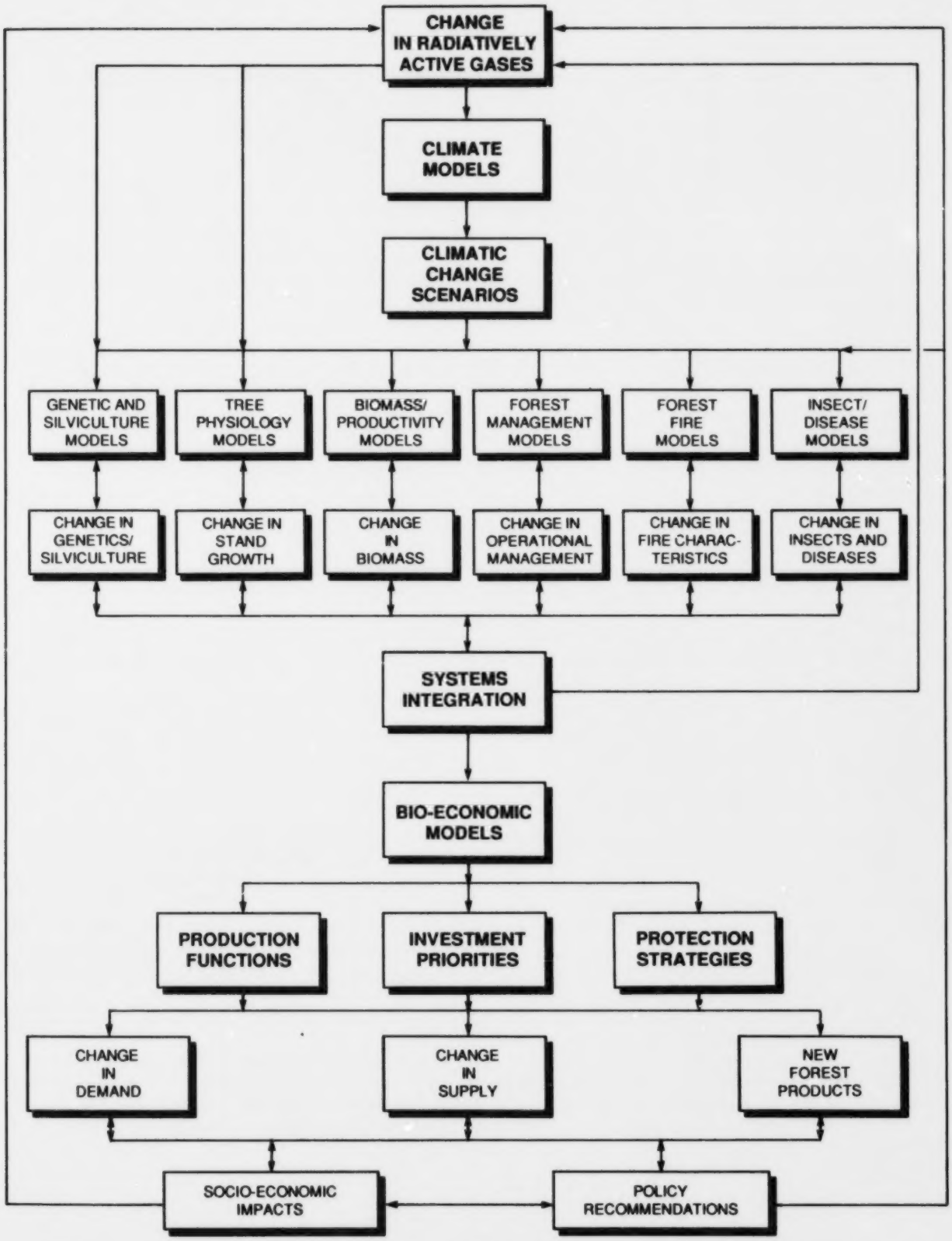



Figure 3. System Diagram Illustrating Climatic Change/Forest/Economics Interactions

model are input to downstream models. Findings are then integrated and finally lead to estimates of changes in economic welfare. This in turn, would be affected by policy changes. The policy changes can affect the biophysical system and also the amounts of the "greenhouse gases." This feedback can then initiate new changes in the whole system.

## 5. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Much of the preliminary quantitative, and even qualitative climatic change impact assessment of this study has not been previously accomplished elsewhere. We consider this work to be the first of this type.

The many and difficult objectives of this study were accomplished. A number of questions, and areas where knowledge is unavailable or scarce, were identified in the main report. The recommendations are summarized by categories in the following sections.

### 5.1 Tree Physiology and Forest Ecology (Including the Direct $CO_2$ Effect)

(1) Critical limiting environmental factors affecting important boreal tree, shrub and grass species should be determined.
(2) Long-term studies of the direct effects of $CO_2$ enrichment on perennial boreal species beyond the seedling stage should be undertaken. Modelling efforts are needed to simulate growth and physiology to identify critical areas of future research.
(3) Experimentation and modelling efforts need to be initiated to bring together information on ecosystem processes, including nutrient cycling, hydroclimatology and natural succession.
(4) Forest zone models should be further developed for studying the projected changes and rates of changes of vegetation boundaries due to climatic change.

### 5.2 Forest Productivity

(1) Records of forest productivity provided from growth layer analyses should be obtained and related to climatic variation over time.
(2) The effects of climatic change need to be studied in relation to wood quality and density.
(3) Forested areas in other parts of the world with present climates similar to those projected for the study area with climatic change should be examined. These areas could provide indications of species and forest management suited to the expected changes.
(4) Forest growth and production models that use climatic data should be developed, or existing models adapted, to suit the study area and objectives. Model results should be tested against actual conditions.
(5) Existing forestry yield tables may need to be adjusted to develop new tables based on the results from the climate productivity models. This information could then be used with the economic models.

## 5.3 Forest Fires, Insects and Diseases

(1) The change in probabilities of extreme climatic events with climatic warming should be determined based on the relationship of extreme events to climatic normals. Then, methods such as the Canadian Fire Danger Rating System could be used to investigate these effects.
(2) Fire management strategies based on fire hazard information should be developed for resource management and planning under climatic change scenarios.
(3) The anticipated changes in the population and composition of insects and diseases need to be investigated to ensure timely action for maintaining the health and well-being of our forests.
(4) The likely effects of the changes in insect and disease infestations on tree growth and yield under climatic change scenarios should be studied and determined to enable precise estimation and management of forest resources and future timber supplies.
(5) A method for incorporating uncertainties associated with forest fires, insect infestations and disease into the economic models needs to be investigated.

## 5.4 Forest and Range Hydrology

(1) The effects of climatic change on the hydrology of forests and rangelands need to be studied for various components of the hydrological cycle.
(2) The impacts of changes in snow accumulation, melt patterns, and winter temperatures on harvesting practices and logging systems should be studied.

## 5.5 Forest Management

(1) The effects of climatic change on the regeneration and establishment of seedlings should be studied on a short-term basis through simulation modelling and controlled environment studies; these also need to be addressed on a long-term basis by field research and experimentation.
(2) Soil moisture status and nutrient potential of forest lands should be studied as an essential prerequisite for accurate prediction of forest responses under a warmer climate.

## 5.6 Forest Economics

(1) Future research should consider the likely changes in forest supplies from other regions of the world as these will also be affected by a changing climate.
(2) A dynamic model incorporating increased risks and uncertainties under climatic change scenarios should be developed. Stochastic dynamic programming is one recommended approach.

(3) In addition to commercial timber economics, it is essential to assess the nonmarket benefits accruing from recreational, scenic, and the numerous other roles of the boreal forest. The nonmarket values of the western boreal forest may be greater than all other commercial value.

### 5.7 Policy Implications

(1) The likely impacts on the forest need to be addressed in more detail in future research coupled with policy formulation and planning. Policy scenarios could be tested in a dynamic systems approach discussed in Section 4.4 so that decisions can be used to minimize or avoid the anticipated harmful impacts and accentuate the benefits of climatic change.

(2) A case study should be undertaken to assess the consequences and management implications for successful operation of the forestry industry.

### 5.8 Interdisciplinary Systems Approach

(1) It is important to strive for interdisciplinary dialogue among all concerned scientists for assessing the impacts of climatic change. A major benefit of this study is that such an interdisciplinary team currently exists, has developed considerable interdisciplinary expertise, and has identified important interfaces among disciplines.

2) The performance and sensitivity of various impact models and their interconnections should be examined and compared critically. The systems analyses should be extended much beyond this initial stage.

Many very important research needs are identified by this study. Climatic change impact assessments, especially as related to the forests, is in its infancy. Additional phases of this work are highly recommended.

**ACKNOWLEDGEMENTS**

The authors are grateful for the improvements provided by Drs. G.C. Van Kooten and K. Higginbotham, authors of the main report. We also wish to thank Roger Street, now with the Environmental Protection Service, Joan Masterton and Don MacIver, Canadian Climate Centre, Dan Williams, retired agroclimatologist, and Virginia Wittrock, Saskatchewan Research Council for reviewing this manuscript.

## 6. REFERENCES

Arthur, L.M., V.J. Fields and F. Abizadeh. 1987. Socio-economic Assessment of the Implication of Climate Change for Agriculture in the Prairie Provinces: Phase III. Report presented to the Atmospheric Environment Service. Department of Agricultural Economics, University of Manitoba, Winnipeg, March.

Binkley, C.S. 1988. A Case Study of the Effects of CO2-Induced Climatic Warming on Forest Growth and the Forest Sector: B. Economic Effects on the World's Forest Sector. In Parry et al. op. cit., Part I:197-218.

Emanuel, W.R., H.H. Shugart and M.P. Stevenson. 1985. Climatic Change and the Broad-Scale Distribution of Terrestrial Ecosystem Complexes. Climatic Change 7:29-43.

Kates, R. (ed.) 1985. Climate Impact Assessment: Studies of the Interaction of Climate and Society. John Wiley and Sons, New York. 625 pp.

Kauppi, P. and M. Posch. 1985. Sensitivity of Boreal Forests to Possible Climatic Warming. Climatic Change 7(1):45-54.

Kauppi, P. and M. Posch. 1988. A Case Study of the Effects of $CO_2$-Induced Climatic Warming on Forest Growth and the Forest Sector: A.Productivity Reactions of Northern Boreal Forests. In Parry et al. op. cit., Part I:183-195.

Lyon, K.S. and R.A. Sedjo. 1983. An Optimal Control Theory Model to Estimate the Regional Long-Term Supply of Timber. Forest Science 29(4):798-812.

Parry, M.L., T.R. Carter and N.T. Konijn (eds.). 1988. The Impact of Climatic Variations on Agriculture, Vol.1: Assessments in Cool Temperate and Cold Regions. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 876 pp.

Peterson, E.B., M.M. Peterson and R.D. Kabzens. 1983. Impact of Climatic Variation on Biomass Accumulation in the Boreal Forest Zone: Selected References. Canadian Forestry Service, Info. Rep. NOR-X-254. 353 pp.

Stabler, J.C., G.C. Van Kooten and N. Meyer. 1988. "Methodological Issues in Appraisal of Regional Resource Development Projects," The Annals of Regional Science 22 (July):13-25.

Street, R. 1987. Personal Communication. Applications and Impacts Division, Canadian Climate Centre, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario.

Thornthwaite, C.W. 1931. The Climates of North America According to a New Classification. Geog. Rev. 21:633-655.

Turc, L. and H. Lecerf. 1972. Indice Climatique de Potentialite Agricole. Science du Sol 2:81-102.

Van Kooten, G.C. 1988. Risk and Uncertainty in Forest Management: Choosing a Method of Analysis. SRC Technical Report No. 219, Publication No. E-906-33-B-88. Saskatchewan Research Council, Saskatoon. 65 pp.

Van Kooten, G.C. and L.M. Arthur. 1988. "Assessing Economic Benefits of Climate Change on Canada's Boreal Forest." Mimeograph. Department of Agricultural Economics, Univ. of Manitoba, Winnipeg, Manitoba.

Williams, G.D.V. and J.M. Masterton. 1983. An Application of Principal Component Analysis and an Agroclimatic Resource Index to Ecological Land Classification for Alberta. Climatological Bulletin 17:3-28.

Williams, G.D.V. 1985. Estimated Bioresource Sensitivity to Climatic Change in Alberta, Canada. Climatic Change 7:55-69.

Williams, G.D.V., R.A. Fautly, K.H. Jones, R.B. Stewart and E.E. Wheaton. 1988. Estimating Effects of Climatic Change on Agriculture in Saskatchewan, Canada. In Parry et al. op. cit., Part II:221-379.

Environnement Canada
Environment Canada

Canada

**SOMMAIRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

SCC 87-01 Programme canadien des incidences climatologiques

SCC 87-02 Conséquences de changement climatique sur l'agriculture en Ontario

SCC 87-03 Répercussions d'un changement de climat sur la navigation et la production d'électricité dans les Grands Lacs

SCC 87-04 Effets d'un hausse d'un mètre du niveau moyen de la mer a Saint-Jean (Nouveau-Brunswick) et au passage inférieur du Saint-Jean

SCC 88-01 Répercussions du changement climatique sur l'agriculture dans les Provinces des Prairies

SCC 88-02 Étude préliminaire des effets éventuels d'une hausse d'un mètre du niveau de la mer a Charlottetown, dans l'Ile-du-Prince-Édouard

SCC 88-03 Répercussions d'un changement climatique sur l'industrie du ski alpin au Québec

SCC 88-04 Perspectives économiques liées aux répercussions de la variabilité et du changement climatiques : Rapport sommaire

SCC 88-05 Incidences du changement climatique sur le tourisme et les loisirs en Ontario

SCC 88-06 Evaluation des effets du changement climatique sur l'agriculture en Saskatchewan, Canada

SCC 88-07 Évaluation socio-économique des conséquences physiques et écologiques du changement climatique sur le milieu marin dans la region de l'Atlantique - Phase I

SCC 88-08 Impacts d'un changement climatique sur les ressources naturelles du Québec

SCC 88-09 Changement climatique causé par le $CO_2$ en Ontario - Interdépendences et stratégies en matière de ressources

SCC 89-01 Réchauffement climatique et position relative du Canada en agriculture

SCC 89-02 Exploration de l'incidence du changement climatique sur la forêt boréale et l'économie forestière de l'ouest du Canada.

Environnement Canada
Environment Canada

# EXPLORATION DE L'INCIDENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FORÊT BORÉALE ET L'ÉCONOMIE FORESTIÈRE DE L'OUEST DU CANADA

Résumé du document intitulé :

EXPLORATION ET ÉVALUATION DE L'INCIDENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FORÊT BORÉALE ET L'ÉCONOMIE FORESTIÈRE DES PROVINCES DES PRAIRIES ET DES TERRITOIRES DU NORD-OUEST : PREMIÈRE PHASE

par

E.E. Wheaton, T. Singh et R. Dempster et K.O. Higginbotham,
J.P. Thorpe et G.C. Van Kooten en collaboration avec J.S. Taylor

Préparé pour

Le Sommaire du changement climatique
Service de l'environnement atmosphérique

par

E.E. Wheaton et T. Singh
Publication du SRC N° E-906-61-A-88

La présente publication s'inscrit dans le cadre des rapports sur l'état de l'environnement.

**DÉNÉGATION DE RESPONSABILITÉ**

La présente publication renferme le résumé des résultats d'un étude menée en vertu d'un contrat par le Saskatchewan Research Council pour le Centre climatologique canadien. Les avis et opinions qui y sont exprimés sont ceux des auteurs. Ils n'expriment, ni ne reflètent nécessairement ceux du gouvernment du Canada ou de tout organisme de celui-ci.

Pour obtenir à titre gracieux des exemplaires de cette publication, écrire au :

Division des services climatologiques
Centre climatologique canadien
4905 Rue Dufferin
Downsview (Ontario)
M3H 5T4
(416)739-4324

Pour acheter des exemplaires du rapport complet, "An Exploration and Assessment of the Implications of Climatic Change for the Boreal Forest and Forestry Economics of the Prairie Provinces and Northwest Territories: Phase One", écrire à

Environment Division
Saskatchewan Research Council
15 Innovation Blvd.
Saskatoon, Saskatchewan
S7N 2X8

Publié avec l'autorisation du
Ministre de l'Environnement

Ministre des Approvisionnements
et Services Canada 1988

No de catalogue EN57-27/1989-02
ISBN 0-662-56798-6
ISSN 0835-3980

## AVANT-PROPOS

En l'espace d'un an, dans quatre grandes déclarations internationales, on a affirmé que le changement de l'atmosphère et, en particulier, le réchauffement du climat, constituait un important problème environnemental nécessitant une action politique.

En juin 1988, un grand groupe de décisionnaires, de scientifiques, d'économistes et d'autres experts de 46 nations, qui participaient à la Conférence mondiale sur l'atmosphère en évolution tenue à Toronto, a déclaré ceci: "L'humanité se livre sans frein à une expérience inconsciente qui touche l'ensemble du globe et dont les conséquences définitives ne le céderaient en rien, sinon à une guerre nucléaire mondiale." Les participants faisaient allusion au rapide changement que subit la composition de l'atmosphère terrestre du fait de l'émission de polluants par l'homme.

Sept mois plus tard, en janvier 1989, l'Assemblée générale des Nations Unies a adopté la "résolution de Malte", qui se fait l'écho des préoccupations exprimées dans la déclaration de la conférence de Toronto et qui incite les gouvernements et les organismes du monde entier à considérer le climat comme une question prioritaire. En février, à la Conférence internationale de New Delhi sur le réchauffement du globe et le changement climatique: Perspectives pour les pays en voie de développement, les participants ont déclaré que le réchauffement du globe constituait "la plus grande crise jamais affrontée collectivement par l'homme". Le 10 mars 1989, les chefs d'état de 24 nations ont signé la "Déclaration de La Haye", suivant laquelle "Aujourd'hui, les conditions mêmes de vie sur notre planète sont compromises par les graves attaques que subit l'atmosphère terrestre."

Il est de plus en plus manifeste, d'après les faits scientifiques, que l'atmosphère terrestre fait l'objet d'importants changements. Ceux-ci ont, à certains égards (comme la concentration du $CO_2$), dépassé les limites des fluctuations atmosphériques naturelles survenues depuis au moins les 100 000 dernières années. D'après les projections, ils s'intensifieront beaucoup à la longue. Il est fort probable que le monde que nous léguerons aux prochaines générations présentera un climat différent de tout autre climat que l'humanité ait déjà connu.

Nombre d'études internationales ont déjà tenté d'évaluer les implications de ces changements. Au Canada, le Service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada joue dans ce domaine un rôle de précurseur. En effet, en 1984, il a mis en application un programme d'évaluation et de détermination des répercussions sociales et économiques éventuelles du réchauffement climatique. On a conçu la présente série de publications pour fournir, sous forme de résumés, les résultats de ces études et pour dégager les autres questions liées au changement climatique.

Len Good

Len Good
Sous-ministre
Environnement Canada

## PRÉFACE

Le Centre climatologique canadien (CCC) a financé plusieurs études touchant les effets éventuels, sur divers secteurs de l'économie canadienne, du réchauffement du climat prévu du fait de la concentration croissante des "gaz de serre" dans l'atmosphère. On a retenu le cas d'une quantité deux fois plus importante de $CO_2$.

Le premier numéro du Sommaire du changement climatique indique les principales études de prospective socio-économique entreprises depuis 1984. La liste des titres antérieurs de la série figure au verso de la première page de couverture.

Le présent rapport résume les résultats initiaux d'une étude préliminaire destinée à évaluer les implications du changement climatique provoqué par le $CO_2$ pour les forêts boréales des provinces des Prairies et les Territories du Nord-Ouest.

Cette étude visait à évaluer l'état actuel des connaissances relatives aux répercussions du changement climatique sur la croissance et la physiologie des arbres, afin de concevoir un plan d'évaluation de l'utilisation des modèles changement climatique/forêt/économie et d'entreprendre des études prospectives préliminaires du changement climatique.

Ce rapport décèle d'importantes lacunes dans les connaissances touchant la façon dont la forêt réagira au changement climatique, mais il signale clairement que l'effet de serre pourrait exercer une importante influence sur les forêts boréales de l'ouest du Canada.

Dr. D. Kirk Dawson
Directeur général
Centre climatologique canadien

## 1. FAITS SAILLANTS

- On a entrepris une étude documentaire poussée concernant les répercussions du changement climatique sur la croissance et la physiologie des essences, les effets directs de l'enrichissement en $CO_2$, la productivité de la forêt, les régions forestières, les incendies de forêt, les insectes et maladies, et l'économie forestière. Cette étude a révélé qu'il fallait approfondir un bon nombre de sujets.

- Les ressources climatiques modifiées ont été calculées et décrites selon plusieurs scénarios de changement climatique utilisant les résultats du Modèle de circulation générale (MCG). Par exemple, les résultats des degrés-jours de croissance indiquent une augmentation de 13 à 48 % par rapport à la normale pour les points de grille examinés relativement aux scénarios de changement climatique.

- On a examiné le déplacement possible vers le nord de la forêt boréale en utilisant les isolines des degrés-jours de croissance de 600 et de 1 300 comme approximations des limites septentrionale et méridionale de la forêt boréale. Le scénario de changement climatique révèle des déplacements considérables dans les zones climatiques occupées par la forêt à la suite du réchauffement dû aux gaz d'effet de serre. Le déplacement possible vers le nord de la limite septentrionale se situe entre 100 et 700 km environ. Dans le cas de la limite méridionale il se situe entre 250 et 900 km environ.

- On a utilisé un indice climatique de la productivité potentielle de la biomasse et des facteurs qui la composent pour explorer les incidences des scénarios de changement climatique sur la forêt boréale. Au nombre des exemples des changements de la productivité potentielle de la biomasse on compte une diminution par rapport à la normale d'environ 2 à 12 % pour les emplacements situés au sud et une augmentation pouvant atteindre 50 % par rapport à la normale pour les points de grille situés dans la partie nord de la zone où domine la forêt.

- On a mis au point et vérifié un modèle de régression linéaire multiple qui établit une relation entre la productivité forestière et le climat. Les données limitées ont permis cependant de trouver une relation significative positive entre la vitesse de croissance de la forêt d'une part et les températures de saison de croissance et l'humidité disponible d'autre part.

- On a conçu et vérifié un modèle de zones climatiques applicable à la forêt boréale. Les résultats de l'incidence de l'un des scénarios de changement climatique ont été calculés et examinés. D'après les résultats préliminaires, la zone écoclimatique de la tremblaie-parc s'étendrait vers le nord dans la partie ouest de la région étudiée et la zone écoclimatique tempérée

boréale s'étendrait vers l'ouest dans la partie est de la zone étudiée s'il se produisait un réchauffement climatique.

° On a déterminé un modèle économique dynamique permettant d'analyser les avantages économiques du changement climatique. On a abordé le problème consistant à déterminer la fonction objective appropriée ainsi que les contraintes relatives à un tel modèle et l'on a effectué certaines estimations qualitatives préliminaires. En outre, on a déterminé qu'il y avait des commodités importantes non commerciales dont il fallait également tenir compte dans la fonction objective. On a identifié le besoin d'effectuer des recherches plus poussées et d'établir des contacts avec les membres de certaines équipes ne travaillant pas dans le domaine économique.

° On a mis au point une approche axée sur une analyse fonctionnelle pour illustrer et explorer les interactions entre le changement climatique, la forêt, l'économie et les politiques. On a appliqué à l'étude une intégration interdisciplinaire.

## 2. INTRODUCTION ET OBJECTIFS

La structure et le fonctionnement de l'écosystème de la forêt boréale dépend très nettement du climat comparativement à un bon nombre d'autres écosystèmes. De nombreuses caractéristiques de la forêt boréale, notamment la physiologie et la productivité des essences, les zones de végétation, les incendies de forêt, les insectes et maladies, sont inextricablement liées au climat. Le présent rapport résume les résultats obtenus au cours de la première phase d'une étude exploratrice visant à évaluer les répercussions du changement climatique induit par le $CO_2$ sur la forêt boréale des Prairies et des Territoires du Nord-Ouest. La région étudiée fait partie d'une vaste ceinture forestière s'étendant de la côte est du Canada à l'Alaska, ce qui représente 82 % des terres forestières canadiennes. Outre leur contribution importante à l'économie canadienne, les forêts boréales fournissent un habitat irremplaçable pour la faune ainsi que d'autres avantages non commerciaux comme la conservation, l'absorption de la pollution, les loisirs et la régulation du climat à l'échelle du globe.

Les objectifs de la présente étude étaient les suivants :

(1) Revoir et évaluer l'état actuel des connaissances relatives à l'incidence du changement climatique induit par le $CO_2$ sur la croissance et la physiologie des essences (notamment les effets directs des concentrations élevées de $CO_2$, les régions forestières, les incendies de forêt, les insectes et maladies, la gestion forestière, l'économie et les politiques forestières.

(2) Chercher des méthodes appropriées permettant d'évaluer les effets du changement climatique mentionnés au point précédent.

(3) Élaborer un cadre de travail permettant d'évaluer les modèles devant servir au système de changement climatique/forêt/économie et élaborer une méthode d'analyse fonctionnelle qui démontre et évalue les liens et les rétro-actions parmi les modèles et ceux qui les conçoivent.

(4) Évaluer et choisir des scénarios de changement climatique qui seront utilisés dans la présente étude.
(5) Entreprendre, dans la mesure du possible, des évaluations préliminaires quantitatives de l'incidence du changement climatique, sinon effectuer des évaluations qualitatives.
(6) Formuler des recommandations pour des études ultérieures.

## 3. EXAMEN DE LA DOCUMENTATION

Même si quelques études ont traité des effets possibles du réchauffement climatique prévu sur les plantes agricoles (p. ex. Parry et al., 1988; Arthur et al., 1987), très peu ont porté essentiellement sur la forêt boréale. Les études de Kauppi et Posch (1985, 1988) et de Binkley (1988) comptent parmi les quelques exceptions. Kates (1985) a donné un aperçu de l'évaluation de l'impact climatique et il se réfère à certaines recherches pertinentes en foresterie. Certaines études portant sur la biomasse sont également pertinentes, notamment celles de Williams (1985), de Williams et Masterton (1983), de Williams et al. (1988) et de Emanuel et al. (1985). La bibliographie compilée par Peterson et al. (1983) est utile car elle englobe l'incidence des variations climatiques sur l'accumulation de la biomasse dans la zone forestière boréale. Durant l'examen de la documentation, nous attirons l'attention sur les données pertinentes et nous suggérons les incidences possibles. Les sujets examinés sont notamment les effets directs de l'enrichissement en $CO_2$ et les effets du changement climatique sur la physiologie et la croissance, la production forestière, la structure et le fonctionnement des écosystèmes forestiers, les zones climatiques, la modélisation des incidences, les incendies de forêt, les insectes et maladies, ainsi que les méthodes permettant d'estimer les avantages économiques.

### 3.1 Effets directs de l'enrichissement en $CO_2$ sur les essences ayant une importance économique

On connait peu de chose des effets directs de l'enrichissement en $CO_2$ sur les principales essences boréales, même si ces effets sont, semble-t-il, le résultat des effets sur la photosynthèse et l'efficacité de l'utilisation de l'eau. Les études portant sur le pin lodgepole, l'épinette blanche et le tremble indiqueraient un effet "fertilisant" important, dû à l'augmentation du $CO_2$, sur la production de la biomasse, la croissance en hauteur, la production de superficie foliaire et la ramification au stade de semis. L'importance des effets dépend fortement des concentrations des autres facteurs environnementaux indispensables et des éléments minéraux. Il n'existe actuellement aucune étude disponible indiquant la façon dont les résultats des recherches sur les semis pourraient être extrapolés à des essences plus anciennes.

L'efficacité d'utilisation de l'eau (photosynthèse/transpiration) augmente chez la plupart des espèces dans des conditions d'enrichissement en $CO_2$ car il se produit une fermeture partielle des stomates. Le degré d'amélioration dépend de l'importance de l'effet de fermeture et des caractéristiques physiologiques de l'espèce. Les plantes ombrophiles ont généralement une résistance stomatique plus élevée que les espèces intolérantes dans des condi-

tions normales de $CO_2$. Par conséquent, l'effet peut être plus important sur les espèces intolérantes.

### 3.2 Effets sur la physiologie, la croissance et la production

Le climat influe sur un bon nombre de processus physiologiques des essences qui conduisent finalement à la production de bois. Le processus fondamental de la production est la photosynthèse et le taux net de production grâce à la photosynthèse dépend de la température, il atteint un maximum à 15-25 °C pour les espèces des forêts boréales. Cependant, les essences sont en mesure d'ajuster cette réaction suivant les changements de température, soit par phénomène "d'acclimatation" au sein d'une plante individuelle, soit par migration des populations locales qui s'accompagne de différentes adaptations génétiques au climat.

L'effet le plus important est vraisemblablement la limite qu'imposent la longueur et la chaleur de la saison de croissance sur la production. Les arbres doivent entrer en dormance pour survivre à l'hiver boréal. Il ne se produit aucune production nette au cours de périodes prolongées où les températures sont inférieures au point de congélation. Au printemps, il faut que la température chaude dure suffisamment longtemps pour que les bourgeons s'ouvrent et que les nouvelles feuilles commencent la photosynthèse. Par conséquent, la production peut être supérieure sous des climats à saison de croissance plus longue et plus chaude.

L'apport en humidité est également essentiel pour la production végétale. Si l'humidité est insuffisante, les plantes ferment leurs pores foliaires pour réduire la perte d'eau mais ceci empêche l'absorption de $CO_2$ nécessaire à la photosynthèse.

Les plantes nécessitent également un apport en éléments nutritifs minéraux, comme l'azote et le phosphore, qu'elles puisent dans le sol. Le processus de libération des éléments nutritifs contenus dans les matières organiques mortes est relativement lent aux faibles températures de la région boréale et il peut en résulter une carence en éléments nutritifs. Le réchauffement climatique devrait accélérer le cycle des éléments nutritifs et par conséquent avoir un effet bénéfique sur la production boréale si la qualité de la litière ne constitue pas un facteur limitant.

Par conséquent, tous ces facteurs contribuent à une productivité forestière généralement plus élevée sous des climats chauds et humides. Selon un bon nombre d'auteurs, l'apport en humidité est généralement suffisant dans la forêt boréale et la température est le facteur limitant le plus important en ce qui concerne la productivité. Toutefois, la forêt boréale de la région étudiés est relativement sèche, de sorte qu'il faut également tenir compte de l'insuffisance d'humidité comme facteur limitant possible. Il n'y a, semble-t-il, guère de données disponibles sur les conséquences du stress d'humidité chez les espèces boréales.

### 3.3 Effets sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes de la forêt boréale

Un certain nombre de facteurs liés à la structure et au fonctionnement des écosystèmes des forêts boréales peuvent être touchés. La compétition pour les ressources est l'une des voies les plus importantes selon lesquelles les organismes interagissent dans un écosystème. Il reste encore à étudier, dans les écosystèmes forestiers, la façon dont ces relations peuvent se modifier à la suite d'une augmentation du $CO_2$. Les interactions compétitives peuvent être modifiées car chaque espèce réagit différemment. Divers autres processus, comme la décomposition de la matière organique morte ou l'écoulement des eaux agissent pour conserver, ajouter ou éliminer les ressources du système. Ces processus interviennent également dans le changement qui produit des effets. Cependant, nos connaissances sur la nature quantitative des processus intervenant dans un écosystème boréal sont limitées.

### 3.4 Effets sur les régions forestières

Un autre aspect important de l'impact du climat sur les forêts est la répartition des différents types de végétation en régions. A partir de la forêt boréale principale, il existe une zone de transition vers le nord jusqu'à la toundra arctique dépourvue d'arbres. A l'est de l'Amérique du Nord, la forêt de feuillus tempérée est située au sud de la forêt boréale, mais dans les Prairies il existe une zone de transition jusqu'à la zone d'herbages plus sèche.

En général, il existe une corrélation entre les limites septentrionale et méridionale de la forêt boréale et les modèles de température. Cependant, la zone de transition de la forêt boréale jusqu'aux herbages est, semble-t-il, reliée à l'accroissement de l'aridité climatique. Si l'on compare la distribution des formations forestières et les modèles spatiaux des paramètres climatiques, il semblerait que l'équilibre entre température et précipitations soit essentiel à la transition de l'écozone boréale jusqu'à l'écozone d'herbage. Au sein de la zone boréale principale, on constate également des variations de la composition des espèces, variations qui reflètent le gradient allant d'un climat plus humide à un climat plus sec, de l'est vers l'ouest.

### 3.5 Modèles simulant les effets du changement climatique et effet fertilisant direct du $CO_2$

Les modèles simulant l'effet fertilisant direct du $CO_2$ et les effets du changement climatique sur les écosystèmes boréaux n'en sont encore qu'aux prémices. On a élaboré différents modèles pour prévoir la croissance des forêts. Certains sont relativement simples et s'appuient sur les relations statistiques trouvées entre les mesures de la productivité et les mesures du climat.

Il est possible d'améliorer de telles relations en tenant compte des caractéristiques de la forêt et du climat et en réduisant la région géographique.

On a élaboré des modèles mathématiques plus complexes qui simulent mieux les processus intervenant dans les formations forestières. Ceci permet d'obtenir une plage plus vaste de prévisions, comparativement aux modèles simples. Certains de ces modèles tentent de simuler très étroitement les processus biologiques dans les plantes.

Les modèles moins détaillés, même s'ils simulent certains processus, utilisent également une approche statistique simple pour établir certaines relations. Ils permettent de prévoir la production dans certains types de formations forestières et de prévoir les variations de la composition des forêts sur des centaines d'années de succession ou de changements climatiques.

Malheureusement, aucun des modèles étudiés ne convient parfaitement aux fins de la présente étude dans sa forme actuelle. Certains de ces modèles exigent des mesures quotidiennes sur des échantillons de plantes, de sol et/ou des mesures quotidiennes de la température; par conséquent on ne peut les utiliser pour effectuer des prévisions sur de vastes régions. Certains des modèles ont été élaborés pour un type précis de forêt, de sorte que les chiffres utilisés ne sont pas appropriés à la forêt boréale. D'autres modèles sont plus généralement applicables, mais nécessitent des modifications si l'on veut relier plus étroitement leurs prévisions aux données réelles de croissance dans la région étudiée. Par conséquent, il y aurait lieu de mettre au point des modèles plus appropriés à l'évaluation de l'impact du changement climatique sur la forêt boréale.

### 3.6 Effets sur les incendies de forêt, les insectes et maladies

Il existe une relation étroite entre l'activité des incendies de forêt et les phénomènes météorologiques. De la même façon, l'activité, l'abondance et la distribution de certains insectes et de certaines maladies sont influencées par la température et le climat. On peut généralement s'attendre à ce que les changements climatiques prévus augmentent la fréquence des incendies et l'activité de la plupart des insectes et maladies communes dans les formations forestières boréales. En outre, l'augmentation de la durée de la saison chaude pourrait prolonger la saison des incendies de forêt et l'activité des insectes et des maladies. Les modifications des espèces et de la couverture végétale pourrait entrainer des modifications des populations d'insectes et des maladies.

### 3.7 Méthodes permettant d'évaluer les avantages économiques du changement climatique

Il faut utiliser une économie de bien-être appliquée pour évaluer les avantages ou les coûts économiques du changement climatique. Dans de telles analyses, il est important d'établir une distinction entre les effets économiques et les avantages économiques. Les effets économiques comportent une variation de la répartition du revenu ainsi qu'une variation des excédents économiques, c'est-à-dire, l'excédent du producteur et l'excédent du consommateur. Seuls les excédents représentent des avantages économiques (ou coûts). Les principes de l'économie de bien-être appliquée et l'emploi des études de

rentabilité ne permettent de mesurer que les avantages et les coûts économiques, c'est-à-dire les fluctuations des surplus. En définissant les avantages économiques de cette façon on laisse supposer que la valeur ajoutée n'est pas une mesure substitut valable à l'avantage économique. En effet, la valeur ajoutée ne tient pas compte du coût d'option des ressources que l'on détourne d'autres industries pour faire face aux fluctuations intervenant dans l'industrie faisant l'objet d'une étude (Stabler, Van Kooten et Meyer, 1988).

Toutefois, ceci ne sous-entend pas que les mesures des effets économiques sont négligeables et qu'il n'est pas utile de mesurer la valeur ajoutée déterminée à partir de modèles d'entrées-sorties. Les mesures de l'impact économique sont importantes car elles indiquent la façon dont le changement climatique peut influer sur la répartition des avantages économiques. Néanmoins, aux fins de l'étude actuelle, il serait approprié de déterminer tout d'abord s'il est possible de retirer ou non des avantages économiques (par opposition aux coûts) du changement climatique et quelle importance pourrait avoir ces avantages.

On a examiné trois façons de mesurer les avantages économiques; l'utilisation de modèles économétriques, la programmation linéaire et l'optimisation dynamique. Plusieurs critères ont servi à évaluer les modèles existants. Le plus important était de savoir à quel degré les méthodes pouvaient coller aux principes de l'économie de bien-être appliquée. Les méthodes choisies doivent être en mesure de déterminer et de quantifier le flux actualisé des avantages économiques nets et, en raison de la nature du changement climatique et des écosystèmes forestiers, le modèle doit être dynamique. C'est ainsi que plusieurs modèles économétriques n'ont pas été retenus. Les modèles d'optimisation dynamique en revanche satisfont à ces critères.

Le deuxième critère de sélection d'une méthodologie appropriée à été "la modification". Les modèles économétriques ont pour caractéristique d'être en général conçus spécifiquement pour un problème donné et de n'être pas très très souples. C'est également le cas des modèles d'optimisation dynamique, mais les techniques permettant de déterminer et d'estimer ces modèles ne sont pas aussi hétérogènes comparativement aux modèles économétriques. Par conséquent, on a proposé un modèle susceptible d'être modifié pour tenir compte des incertitudes relatives à la croissance des formations forestières, incertitudes causées par les insectes, les maladies et les incendies de forêt.

Le dernier critère était la nature pratique de l'estimation du modèle. On a finalement recommandé la programmation dynamique, méthode qui semblait avoir le plus de chances de bien évaluer les avantages économiques du changement climatique.

## 4. ANALYSES DE L'INCIDENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

### 4.1 Modèles de changement climatique

Le changement climatique qui nous préoccupe en particulier est celui basé sur l'augmentation des concentrations de $CO_2$ et d'autres "gaz d'effet de

serre" dans l'atmosphère et sur les projections de ces tendances. On possède une bonne documentation à ce sujet. Les scénarios utilisés pour explorer le changement climatique et ses effets sont hybrides, on les a mis au point en appliquant les ajustements basés sur le Modèle de circulation générale (MCG) aux données climatiques antérieures (normales de 1951 à 1980), une méthode mise au point par Williams et al. (1988). Les ajustements du MCG correspondant à un climat où la concentration de $CO_2$ aurait doublé sont ceux basés sur les résultats du MCG du Goddard Institute for Space Studies (GISS) et du Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL). Les résultats du MCG ont été fournis par le Centre climatologique canadien pour les points de grille situés à l'intérieur et autour de la région étudiée (Street, comm. pers., 1987).

## 4.2 Ressources climatiques pour la foresterie

On a utilisé plusieurs modèles pour analyser les impacts des scénarios de changement climatique sur les températures (p. ex. les degrés-jours de croissance), l'humidité (p. ex. l'efficacité des précipitations et le facteur de sécheresse), ainsi que les effets combinés température-humidité (indice climatique du potentiel de la biomasse (Turc et Lecerf, 1972)). Ces facteurs climatiques influent sur la production forestière, la formation de régions forestières et sur d'autres caractéristiques.

Il est possible de déterminer le déplacement des limites thermiques de la forêt sous un climat plus chaud en utilisant les isogrammes des degrés-jours de croissance de 600 et de 1 300 comme approximations des limites septentrionale et méridionale de la forêt boréale. Avec cette méthode, les scénarios basés sur le MCG du GISS et du GFDL mettent en évidence des déplacements considérables dans les zones climatiques forestières; le scénario du GISS donne les plus grands déplacements en raison des températures plus élevées (figures 1 et 2). Le déplacement de la limite septentrionale, suivant les scénarios du changement climatique, se situe entre 100 à 700 km environ et le déplacement de la limite méridionale est plus important, soit de 250 à 900 km environ (tableau 1). On peut mettre en doute la vitesse à laquelle la forêt change à la suite d'un changement des ressources thermiques et on peut se demander si la méthode des degrés-jours de croissance convient bien pour étudier les déplacements des zones forestières. Les essences peuvent être en mesure de s'adapter soit par acclimatation au sein de la plante individuelle, soit par migration des populations locales présentant différentes adaptations génétiques au climat. Même si les limites de la forêt boréale sont généralement reliées au type de température, la zone de transition de la forêt boréale aux herbages dépend également, semble-t-il, de l'augmentation de l'aridité climatique.

L'étude des degrés-jours de croissance indique une augmentation de 35 et 48 % par rapport à la normale en ce qui concerne les points de grille du scénario du GISS et une augmentation de 13 à 40 % en ce qui concerne les points de grille représentatifs du GFDL (tableau 3). Si les ressources thermiques de la saison de croissance augmentent jusqu'au degré indiqué par chacun des scénarios de changement climatique, le climat peut être mieux adapté à une végétation d'herbages dans le cas d'une grande partie de la superficie actuellement occupée par la forêt boréale.

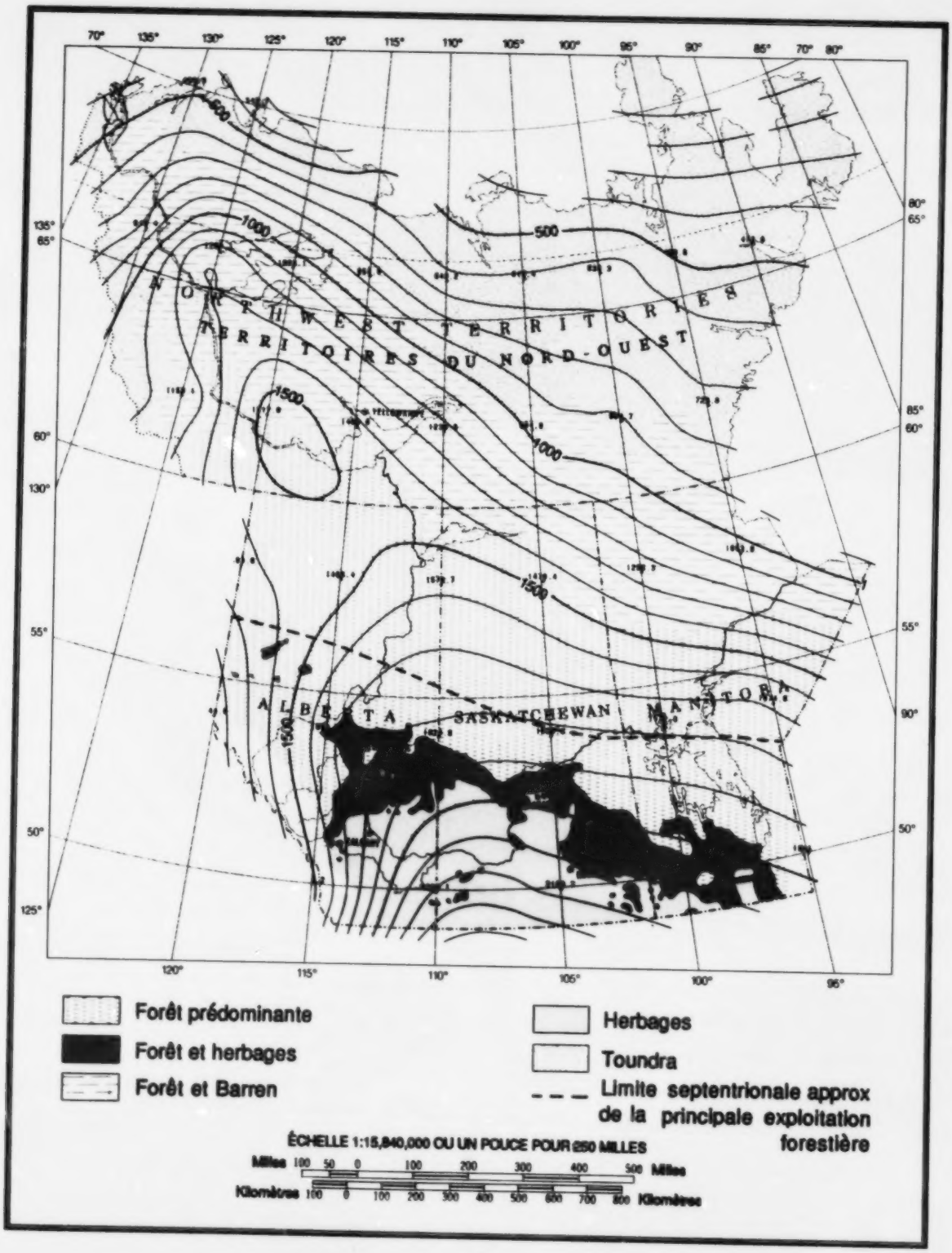



**Figure 1.** Moyenne annuelle des degrés-jours de croissance (plus de 5 °C) pour les scénarios de changement climatique basés sur le GISS

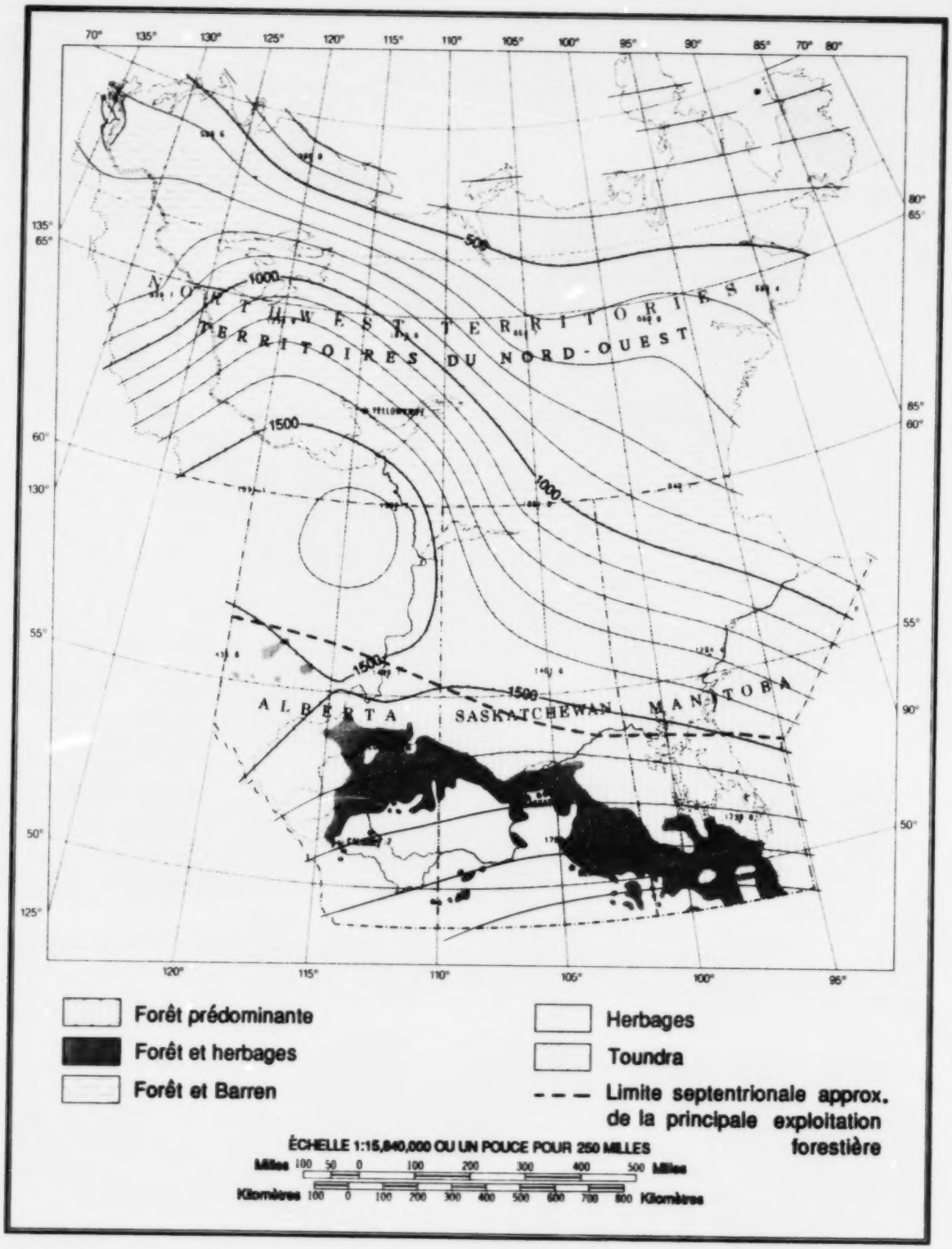



**Figure 2.** **Moyennes annuelles des degrés-jours de croissance (plus de 5 °C) pour les scénarios de changement climatique basés sur le GFDL**

Tableau 1. Déplacement vers le nord (km) des limites septentrionale et méridionale de la forêt boréale (délimitées par les isolènes de 600 et de 1 300) des degrés-jours de croissance selon les scénarios de changement climatique basés sur le GISS et sur le GFDL.

| Limite de la forêt | Scénario de changement climatique | |
|---|---|---|
| | GISS | GFDL |
| Septentrionale | De 80 à 720 | De 100 à 730 |
| Méridionale | De 470 à 920 | De 250 à 900 |

Tableau 2. Changement des zones de végétation d'après le scénario du changement climatique basé sur le GFDL (tenant compte de l'augmentation des précipitations).

| Emplacement du point de grille (latitude, longitude) | Régions actuelles | Régions du GFDL |
|---|---|---|
| 64,4° N, 120° W | subarctique | tremblaie-parc |
| 59,9° N, 120° W | boréale | tremblaie-parc |
| 55,5° N, 105° W | boréale | boréale-tempérée |
| 51,1° N, 112,5° W | herbages | herbages |

Tableau. 3. Impacts du changement climatique relativement aux valeurs climatiques normales[a]

| | Emplacement A (58° 00'N 110° 00'W) | | Emplacement B (54° 00'N 105° 00'W) | | Emplacement E (64° 24'N 120° 00'W) | | Emplacement F (55° 30'N 105° 00'W) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Scenario de changement climatique | | | | | | | |
| | GISS1 ($2xCO_2TP$)[c] | GISS2[b] ($2xCO_2T$) | GISS1 ($2xCO_2TP$)[c] | GISS2 ($2xCO_2T$) | GFDL1 ($2xCO_2TP$)[c] | GFDL2[b] ($2xCO_2T$) | GFDL1 ($2xCO_2TP$)[c] | GFDL2 ($2xCO_2T$) |
| DEGRÉS-JOURS DE CROISSANCE (DJC) | +35% | +35% | +48% | +48% | +40% | +40% | +31% | +31% |
| INDICE D'EFFICACITÉ DES PRÉCIPITATIONS (I)[d] | +22% | -10% | +12% | -10% | -6% | -8% | +16% | -7% |
| FACTEUR DE SÉCHERESSE (Fs)[e] | +21% | +4% | -12% | -21% | -28% | -28% | +19% | +4% |
| FACTEUR HÉLIOTHERMIQUE (HT) | +44% | +44% | +33% | +33% | +44% | +44% | +26% | +26% |
| POTENTIEL DE LA BIOMASSE (CA) | +58% | +17% | +19% | -2% | +22% | +13% | +39% | +5% |

| | Emplacement C (58' 00'N 120° 00'W) | | Emplacement D (50' 00'N 100° 00'W) | | Emplacement G (59' 54'N 120° 00'W) | | Emplacement H (51' 06'N 112° 30'W) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | GISS1 | GISS2 | GISS1 | GISS2 | GFDL1 | GFDL2 | GFDL1 | GFDL2 |
| DÉGRES-JOURS DE CROISSANCE (DJC) | +39% | +39% | +38% | +38% | +34% | +34% | +13% | +13% |
| INDICE D'EFFICACITÉ DES PRÉCIPITATIONS (I)[d] | +19% | -8% | +3% | -11% | +6% | -9% | +17% | -8% |
| FACTEUR DE SÉCHERESSE (Fs)[e] | -3% | -17% | +4% | -2% | +10% | -4% | +2% | -24% |
| FACTEUR HÉLIOTHERMIQUE (HT) | +54% | +54% | +21% | +21% | +55% | +55% | +46% | +46% |
| POTENTIEL DE LA BIOMASSE (CA) | +53% | +27% | +1% | -12% | +46% | +13% | +118% | +44% |

[a] Ces valeurs indiquent en pourcentage les augmentations ou les diminutions par rapport aux valeurs climatiques moyennes pour la période normale allant de 1951 (HIST). Les emplacements des points de grille sont présentés à la Figure 1.1 du raport principal; ils sont différents selon le GISS et le GFDL et ont été choisis pour représenter des régions forestières principales.

[b] Les scénarios GISS2 et GFDL2 utilisent des moyennes de précipitations normales.

[c] T et P désignent la température et les précipitations.

[d] Méthode de Thornthwaite (1931).

[e] Les valeurs de $F_S$ plus élevées indiquent des conditions moins sèches, c.-à-d. plus humides.

On a évalué les variations de la productivité de la biomasse potentielle (CA), les sous-constituants de la biomasse potentielle, les facteurs de sécheresse et les facteurs héliothermiques et l'efficacité des précipitations, sous l'influence de quatre scénarios de changement climatique, en utilisant quelques points dans chacune des principales zones forestières (forêt-herbages, forêt prédominante et forêt-toundra). Les résultats préliminaires indiquent que la productivité de la biomasse potentielle pourrait s'accroître d'environ 50 % par rapport aux estimations de la productivité basées sur les données climatiques normales (moyennes de 1951 à 1980) (tableau 3). La productivité augmente beaucoup moins, et même diminue, sans qu'il y ait l'augmentation des précipitations prévue par les MCG.

Aux fins de la présente étude, on a élaboré deux nouveaux modèles préliminaires sur l'incidence du changement climatique : l'un pour simuler les régions forestières boréales et l'autre pour simuler la productivité forestière. Le modèle des régions forestières boréales attribue des stations aux zones de végétation en se basant sur leurs températures de saison de croissance et sur les précipitations annuelles. Les limites septentrionales sont simulées en ne tenant compte que de la température, tandis que les limites méridionales sont fixées par une relation mathématique entre la température et les précipitations. Lorsque ce modèle est utilisé pour des points de grille représentatifs dans la région de l'étude, il attribue correctement leurs zones de végétation actuelle sous le climat actuel. Les résultats préliminaires utilisant le scénario du GSDL indiquent que la zone écoclimatique de la tremblaie-parc pourrait s'étendre vers le nord dans la partie occidentale de la région de l'étude et que la zone écoclimatique boréale-tempérée pourrait s'étendre vers l'ouest dans la partie orientale de la région de l'étude (tableau 2).

Dans le cadre de cette étude, on a également élaboré un modèle préliminaire qui établit une relation entre la productivité forestière d'une part et une mesure de la température et de la disponibilité en humidité d'autre part. Pour obtenir cette relation, on a utilisé une régression linéaire multiple de l'incrément moyen annuel de l'évapotranspiration potentielle et un indice d'humidité pour 21 sections forestières de la zone faisant l'objet de l'étude. Cette analyse indique une bonne relation statistique entre la productivité forestière et le climat ($R^2$ = 0,75). Même avec des données limitées, il existe une relation significativement positive entre la vitesse de croissance de la forêt d'une part et les températures de saison de croissance et la disponibilité en humidité d'autre part.

### 4.3 Modèles de l'impact économique

L'étude examine trois axes vers lesquels on devrait orienter une recherche économique permanente (y compris des recherches plus poussées et l'extension des modèles).

(1) Le modèle économique le plus prometteur en ce qui concerne l'évaluation de l'impact du changement climatique serait la programmation dynamique (PD) (Lyon et Sedjo, 1983). La PD est un modèle de contrôle

optimal appliqué qui peut servir à déterminer une rotation optimale des forêts, rotation qui maximise la somme des excédents économiques actualisés. Il est également possible, semblet-il, de modifier le modèle de PD pour tenir compte des incertitudes. Ainsi, la PD stochastique est considérée dans cette étude comme le moyen le mieux approprié de s'adapter aux effets du changement climatique (voir également Van Kooten, 1988).

(2) L'industrie forestière de la région étudiée fait partie d'une industrie forestière nationale d'exportation. Par conséquent, on ne peut négliger les effets du commerce international sur les excédents économiques. On met au point un modèle micro-économique théorique et commercial dans lequel l'on examine les conséquences sur les avantages économiques dont bénéficie la région étudiée. L'étude théorique indique que le changement climatique dit bénéfique pourrait entrainer un gain net ou une perte nette pour la région étudiée. Cependant, il faut examiner les conclusions sur le plan quantitatif car elles dépendent de l'élasticité de la demande interne et des courbes d'approvisionnement, ainsi que de l'offre à l'exportation et de la demande à l'importation des partenaires commerciaux (Van Kooten et Arthur, 1988). Enfin, cette recherche est importante pour identifier la fonction objective dans le modèle de PD.

(3) Un autre aspect économique de l'étude concerne l'évaluation des avantages associés à la forêt elle-même, avantages qui ne sont pas négociés sur le marché. Ces caractéristiques non commerciales font intervenir les activités récréatives, l'habitat de la faune et la valeur de la forêt en tant que régulateur du climat et de la pollution d'un bassin hydrographique et de l'ensemble du globe. En outre, l'usage multiple de la forêt modifie la nature du modèle, car la gestion forestière modifie les affectations de diverses manières. Ces utilisations multiples, étrangères au marché, doivent se refléter dans la fonction objective du modèle de PD.

## 4.4 Conception du système d'étude de l'effet climatique

On a conçu, pour cette étude, un diagramme préliminaire de système d'étude du changement climatique, de la forêt, de la foresterie et de l'économie, afin d'illustrer les rapports d'interdépendance qui lient les principaux modèles et les principaux effets, ainsi que les boucles de rétroaction (figure 3). Les résultats de chacun des modèles sont introduits dans les modèles situés à l'aval. Les conclusions, qu'on intègre alors, conduisent enfin à l'estimation des changements de la vitalité économique. Cet élément serait, à son tour, modifié par les changements survenant dans les lignes de conduite. Ces changements des lignes de conduite peuvent se répercuter sur le système biophysique et la quantité des "gaz de serre". Cette rétroaction peut alors engendrer de nouveaux changements dans le système intégral.

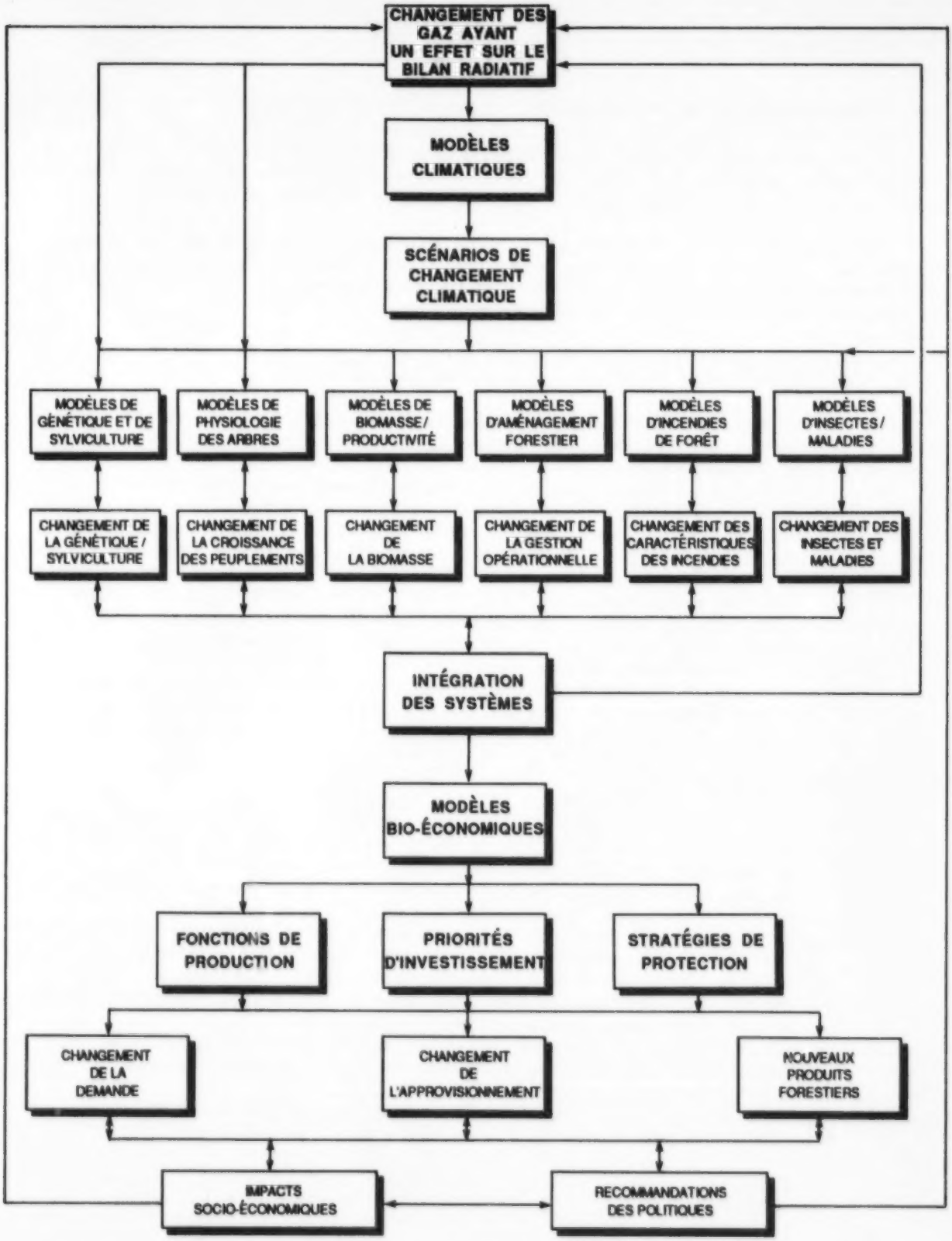

CHANGEMENT DES GAZ AYANT UN EFFET SUR LE BILAN RADIATIF
MODÈLES CLIMATIQUES
SCÉNARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE
MODÈLES DE GÉNÉTIQUE ET DE SYLVICULTURE
MODÈLES DE PHYSIOLOGIE DES ARBRES
MODÈLES DE BIOMASSE/ PRODUCTIVITÉ
MODÈLES D'AMÉNAGEMENT FORESTIER
MODÈLES D'INCENDIES DE FORÊT
MODÈLES D'INSECTES/ MALADIES
CHANGEMENT DE LA GÉNÉTIQUE / SYLVICULTURE
CHANGEMENT DE LA CROISSANCE DES PEUPLEMENTS
CHANGEMENT DE LA BIOMASSE
CHANGEMENT DE LA GESTION OPÉRATIONNELLE
CHANGEMENT DES CARACTÉRISTIQUES DES INCENDIES
CHANGEMENT DES INSECTES ET MALADIES
INTÉGRATION DES SYSTÈMES
MODÈLES BIO-ÉCONOMIQUES
FONCTIONS DE PRODUCTION
PRIORITÉS D'INVESTISSEMENT
STRATÉGIES DE PROTECTION
CHANGEMENT DE LA DEMANDE
CHANGEMENT DE L'APPROVISIONNEMENT
NOUVEAUX PRODUITS FORESTIERS
IMPACTS SOCIO-ÉCONOMIQUES
RECOMMANDATIONS DES POLITIQUES

Figure 3. Diagramme illustrant les interactions changement climatique/forêt/économie

## 5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Dans l'étude, la majeure partie de l'évaluation préliminaire, quantitative et même qualitative, de l'effet du changement climatique n'a jamais été réalisée ailleurs. Nous considérons qu'il s'agit du premier travail de ce genre.

On a atteint les nombreux et difficiles objectifs de l'étude. Le rapport principal fait état de plusieurs questions et de plusieurs domaines où les connaissances sont rares ou inexistantes. Ces recommandations sont résumées par catégories dans les sections suivantes :

### 5.1 Physiologie des arbres et écologie des forêts (y compris l'effet direct du $CO_2$

(1) Il y a lieu d'établir les éléments restrictifs cruciaux de l'environnement qui touchent les espèces importantes d'herbes, d'arbustes et d'arbres boréaux.

(2) Il convient d'entreprendre les études à long terme des effets directs de l'enrichissement en $CO_2$ sur les espèces boréales vivaces au-delà de l'étape des jeunes plants. Pour déterminer les domaines clés de la future recherche, il faut procéder à des activités de modélisation qui simulent la croissance et la physiologie.

(3) Il faut entreprendre des activités d'expérimentation et de modélisation pour rassembler des renseignements sur les processus d'écosystèmes, y compris les cycles nutritifs, l'hydroclimatologie et la succession naturelle.

(4) Il sied d'approfondir la conception des modèles de zones forestières pour étudier les changements et le taux des changements des lignes de démarcation de la végétation à la suite du changement climatique.

### 5.2 Productivité forestière

(1) Il y a lieu d'obtenir les relevés de productivité forestière provenant des analyses de la couche de croissance et de les rattacher à la variation temporelle du climat.

(2) Il faut étudier les effets du changement climatique en fonction de la qualité et de la densité du bois.

(3) Il convient d'examiner les zones boisées des autres régions du monde dont le climat actuel s'apparente aux climats projetés pour la zone étudiée qui subit le changement climatique. Ces zones pourraient donner des indications sur les espèces et la gestion des forêts adaptées aux changements auxquels on s'attend.

(4) Il faut mettre au point des modèles de croissance et de production forestières qui utilisent les données climatiques ou adapter les modèles actuels pour les appliquer à la région de l'étude et aux objectifs. Il faut vérifier les résultats du modèle en fonction des conditions réelles.

(5) Il faudra peut-être apporter certaines modifications aux tableaux actuels sur le rendement des forêts pour élaborer de nouveaux tableaux basés sur les résultats des modèles climat-productivité. Ces données pourront être utilisées par la suite avec des modèles économiques.

## 5.3 Incendies de forêt, insectes et maladies

(1) Il y a lieu de déterminer la variation des probabilités d'avoir des phénomènes climatiques extrêmes à la suite d'un réchauffement climatique, d'après la relation entre les phénomènes extrêmes et les normales climatiques. On pourrait ainsi utiliser des méthodes, comme la méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendies de forêt pour étudier ces effets.

(2) Il y a lieu de mettre au point des stratégies de gestion des incendies d'après des données relatives aux risques d'incendie, ce qui permettrait de gérer et de planifier les ressources en vertu des scénarios de changement climatique.

(3) Il faut étudier les variations prévues dans la population et la composition des insectes et maladies car il faut s'assurer de prendre des mesures opportunes pour maintenir la santé et le bien-être de nos forêts.

(4) Il y a lieu d'étudier et de déterminer les effets probables des variations touchant les insectes et les infestations sur la croissance et le rendement des arbres, d'après des scénarios de changement climatique, afin de permettre une évaluation et une gestion précises des ressources forestières et des stocks futurs de bois.

(5) Il y a lieu d'étudier une méthode permettant d'intégrer dans les modèles économiques les incertitudes reliées aux incendies de forêt, aux infestations et aux maladies causées par des insectes.

## 5.4 Hydrologie des forêts et des terrains de parcours

(1) Il y a lieu d'étudier les effets du changement climatique sur l'hydrologie des forêts et des terrains de parcours, en ce qui concerne divers éléments du cycle hydrologique.

(2) Il y a lieu d'étudier l'incidence du changement de l'accumulation de neige, du type de fonte et des températures hivernales sur les pratiques d'exploitation forestière et les systèmes d'abattage.

## 5.5 Aménagement forestier

(1) Il y a lieu d'étudier à cours terme les effets du changement climatique sur la régénération et l'implantation des semis, grâce à des simulations et des études sur des environnements contrôlés; ces effets doivent être également examinés à long terme grâce à des recherches et à une expérimentation sur le terrain.

(2) Il y a lieu d'étudier les réserves d'humidité du sol et le potentiel en éléments nutritifs des terrains forestiers; cette étude est essentielle si l'on veut prévoir de façon précise la façon dont les forêts vont réagir à un réchauffement du climat.

## 5.6 Économie forestière

(1) Les recherches futures devraient tenir compte des variations susceptibles de se produire dans les ressources forestières des autres régions du monde à mesure que ces dernières seront aussi touchées par un changment climatique.

(2) Il y a lieu de mettre au point un modèle dynamique qui intègre l'augmentation des risques et des incertitudes selon divers scénarios de changement climatique. On recommande d'utiliser la programmation dynamique stochastique.

(3) En plus de l'économie liée au bois ayant une valeur marchande, il est essentiel d'évaluer les avantages non commerciaux qu'offre la forêt boréale sur le plan récréatif, touristique et sur de nombreux autres plans. La valeur non commerciale de la forêt boréale occidentale peut surpasser toutes les autres valeurs commerciales.

## 5.7 Implications des politiques

(1) Il y a lieu d'étudier de façon plus détaillée les impacts probables sur la forêt au cours de recherches futures menées simultanément avec l'élaboration et la planification de politiques. On pourrait vérifier des scénarios grâce à l'approche fonctionnelle dynamique étudiée au paragraphe 4.4, de façon à ce que les décisions puissent servir à minimiser ou à éviter les répercussions néfastes prévues et à accentuer les avantages du changement climatique.

(2) Il y a lieu d'entreprendre une étude de cas pour évaluer les conséquences et les répercussions de la gestion si l'on veut exploiter de façon satisfaisante l'industrie forestière.

## 5.8 Approche fonctionnelle interdisciplinaire

(1) Il est important que tous les scientifiques intéressés puissent établir un dialogue interdisciplinaire pour évaluer les répercussions du changement climatique. Le principal avantage de cette étude réside dans le fait qu'une telle équipe existe, qu'elle possède des compétences notables dans plusieurs disciplines et qu'elle a établi des limites communes importantes parmi les disciplines.

(2) Il faut établir la performance et la sensibilité des différents modèles d'impact ainsi que leurs interconnections puis les comparer de façon critique. L'analyse fonctionnelle devrait se poursuivre au-delà de cette étape initiale.

La présente étude a permis d'identifier des besoins de recherche très importants. L'évaluation de l'incidence du changement climatique, notamment

celle qui touche les forêts n'en n'est qu'à ses prémices. On recommande fortement d'approfondir ce domaine de recherche.

**REMERCIEMENTS**

Nous tenons à remercier, les auteurs du rapport principal, M.G.C. Van Kooten et K. Higginbotham, pour les améliorations qu'ils ont apporté. Nous tenons également à remercier M. Roger Street, actuellement employé au Service de la protection de l'environnement, John Masterton et Don MacIver, du Centre climatologique canadien, Dan Williams, un agroclimatologue maintenant en retraite et Virginia Wittrock du Saskatchewan Research Council. Toutes ces personnes ont revu le présent document.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

Arthur, L.M., V.J. Fields et F. Abizadeh. 1987. Socio-economic Assessment of the Implication of Climate Change for Agriculture in the Prairie Provinces: Phase III. Report presented to the Atmospheric Environment Service. Department of Agricultural Economics, Université du Manitoba, Winnipeg, Mars.

Binkley, C.S. 1988. A Case Study of the Effects of $CO_2$-Induced Climatic Warming on Forest Growth and the Forest Sector: B. Economic Effects on the World's Forest Sector. In Parry et al. op. cit., Part I:197-218.

Emanuel, W.R., H.H. Shugart et M.P. Stevenson. 1985. Climatic Change and the Broad-Scale Distribution of Terrestrial Ecosystem Complexes. Climatic Change 7:29-43.

Kates, R. (ed.) 1985. Climate Impact Assessment: Studies of the Interaction of Climate and Society. John Wiley and Sons, New York. 625 pp.

Kauppi, P. et M. Posch. 1985. Sensitivity of Boreal Forests to Possible Climatic Warming. Climatic Change 7(1):45-54.

Kauppi, P. et M. Posch. 1988. A case Study of the Effects of $CO_2$-Induced Climatic Warming on Forest Growth and the Forest Sector: A. Productivity Reactions of Northern Boreal Forests. In Parry et al. op. cit., Part I:163195.

Lyon, K.S. et R.A. Sedjo. 1983. An Optimal Control Theory Model to Estimate the Regional Long-Term Supply of Timber. Forest Science 29(4):798-812.

Parry, M.L., T.R. Carter et N.T. Konijn (eds). 1988. The Impact of Climatic Variations on Agriculture, Vol. 1: Assessments in Cool Temperate and Cold Regions. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 876 pp.

Peterson, E.B., M.M. Peterson et R.D. Kabzens. 1983. Impact of Climatic Variation on Biomass Accumulation in the Boreal Forest Zone: Selected References. Service canadien des forêts, Info. Rap. NOR-X-254. 353 pp.

Stabler, J.C., G.C. Van Kooten et N. Meyer. 1988. "Methodological Issues in Appraisal of Regional Resource Development Projects," The Annals of Regional Science 22(juillet):13-25.

Street, R. 1987. Communication personnelle, Division des implications et des analyses de l'incidence, Centre climatique canadien, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview (Ontario).

Thornthwaite, C.W. 1931. The Climates of North America According to an New Classification. Geog. Rev. 21:633-655.

Turc, L. et H. Lecerf. 1972. Indice Climatique de Potentialité Agricole. Science du Sol 2:81-102.

Van Kooten, G.C. 1988. Risk and Uncertainty in Forest Management: Choosing a Method of Analysis. SRC Technical Report No. 219, Publication No. E90633B-88. Saskatchewan Research Council, Saskatoon. 65 pp.

Van Kooten, G.C. et L.M. Arthur. 1988. "Assessing Economic Benefits of Climate Change onf Canada's Boreal Forest." Mimeograph. Department of Agricultural Economics, Univ. of Manitoba, Winnipeg, Manitoba.

Williams, G.D.V. et J.M. Masterton. 1983. An Application of Principal Component Analysis and an Agroclimatic Resource Index to Ecological Land Classification for Alberta. Climatological Bulletin 17:3-28.

Williams, G.D.V. 1985. Estimated Bioresource Sensitivity to Climatic Change in Alberta, Canada. Climatic Change 7:55-69.

Williams, G.D.V., R.A. Fautly, K.H. Jones, R.B. Stewart et E.E. Wheaton. 1988. Estimating Effects of Climatic Change on Agriculture in Saskatchewan, Canada. In Parry et al. op. cit., Part II:221-379.